

## 기존 파일기초에 근접한 터널굴착으로 인한 전단변형을 형성에서의 경계선

이용주<sup>1\*</sup>

### A boundary line between shear strain formations associated with tunnelling adjacent to an existing piled foundation

Yong-Joo Lee

**Abstract** A study of interactive ground behaviour due to tunnelling adjacent to existing piles has not been recognized well for the most geotechnical engineers so far. Because this is a very sophisticated boundary condition problem. In this study, therefore, the author has conducted both the laboratory model test and finite element analysis (FEA) to figure out such a complicated ground behaviour related to shear strain formations. Based on the model testing and FEA results, a boundary line which divides into two distinctive shear strain formations in relation to the locations of end-bearing pile tips was proposed. The author believes that the proposed boundary line may be helpful for planning the appropriate tunnel positions for avoiding damage of buildings which supported by piled-foundations in urban areas.

**Keywords:** Tunnelling, end-bearing piles, shear strain formations, boundary line, model test, finite element analysis

**요 지** 현재까지 기존 파일에 근접하여 터널을 굴착할 경우 발생하는 상호적인 지반거동에 대한 연구는 대부분의 지반공학자에게 잘 인식이 되지 않아 왔다. 왜냐하면 이것은 매우 복잡한 경계조건 문제이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 복잡한 지반거동과 관련한 전단변형률 형성을 파악하기 위해 실내모형실험과 더불어 수치해석을 수행하였다. 실험 및 수치해석 결과, 선단지파일의 선단부 위치에 따른 두 개의 뚜렷한 전단변형률 형성을 구분하는 경계선을 제안하였다. 이러한 경계선은 도심지에서 파일로 지지되는 빌딩의 손상을 방지하기 위해 적절한 터널의 위치를 계획하는데 있어 도움이 될 것이라고 판단한다.

**주요어:** 터널굴착, 선단지파일, 전단변형률 형성, 경계선, 모형실험, 유한요소해석

## 1. 서 론

도심지에서의 터널굴착은 기존 파일기초에 근접하여 시행되는 경우가 빈번히 발생하곤 한다. 이러한 터널 굴착시 발생하는 지반의 변형은 지하구조물의 안정성은 물론, 주변 지상구조물의 안정성에도 위협이 되므로 설계 단계부터 신중히 검토할 필요가 있다(신종호 등, 2005).

파일-지반-터널굴착에 대한 상호거동에 대한 연구는 대부분 비배수 조건인 점성토 지반에서 지표 및 지중 침하에 대한 분석과 더불어 파일에 대한 거동, 즉 침하, 휨 모멘트 및 축력에 관련된 연구가 현재까지 많이 진행되어 왔다(Bezuijen and van der Schrier, 1994, Hergarden et al., 1996, Loganathan et al., 2000, Lee & Ng, 2005).

한편 사질토 지반에서의 연구는 Morton & King(1979)의 실내모형실험을 기점으로 Jacobsz(2002)의 원심모형 실험, Mroueh & Shahrouh(2002)의 3차원 유한요소해석, Lee(2004)의 근거리 사진계측을 이용한 실내모형 실험이 있다.

최근 Cheng et al.(2007)은 연약지반에서 터널굴착으로 인한 지반 및 파일에 대한 거동을 유한요소해석을 통해 사실적으로 모사하기 위해 “변위제어모델(DCM: Displacement Controlled Model)”을 제안하였다. 변위 제어모델은 터널굴착으로 인한 지반손실과 밀접한 관계가 있으며  $\beta$ 라는 변수를 구하여 터널 경계면에 위치하는 노드(node)를 통해 변위를 직접 입력하는 방법이다. 기존의 터널굴착은 “하중제어모델(FCM: Force Controlled Model)”을 주로 사용하였다. 이러한 방법은 터널 경계면의 반경방향 응력의 감소로 인해 인버트에서 히빙이 과도하게 일어나며 터널과 이격거리가 먼 지역의 지반

<sup>1</sup>정회원, 포항산업과학연구원, 토목연구본부, 선임연구원  
\*교신저자: 이용주 (ucesyj199@rist.re.kr)

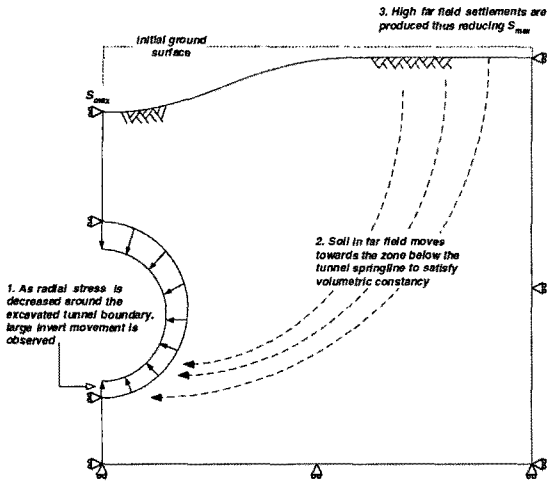


그림 1. 하중제어모델(FCM)로 터널굴착을 모사한 경우의 문제점(Cheng et al., 2007)

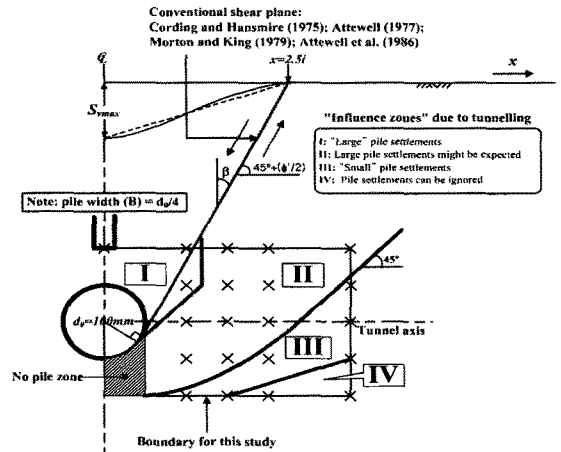


그림 2. 터널굴착으로 인한 선단지파일의 침하영향권(Lee & Bassett, 2007)

이 터널 스프링 아래 지점을 향해 이동한다. 따라서 지표면 침하가 터널과 이격된 거리가 먼 곳에서 침하가 크게 발생하는 문제점을 가지고 있다(그림 1 참조). 이와는 대조적으로 위에서 언급한 DCM을 사용하여 역해석한 결과, 실험 및 현장계측에 대한 변위 양상과 매우 유사하게 나타나 그 유효성을 검증하였다. 본 연구에서는 Cheng et al.(2007)이 제안한 DCM과 유사한 방법으로 Lee(2004)가 제안한 근거리 사진계측기법을 통해 얻은 터널 경계면에서의 변위 값을 터널 경계면 노드(node)에 직접 입력하여 모형터널에 의한 굴착효과를 모사하였다.

본 연구에서는 선단지파형태(end-bearing type)의 2차원 파일을 모사하기 위해 연속적으로 설치되는 일렬의 파일을 벽체로 간주하였다(Potts and Zdrakovic, 1999). 도심지에서의 파일시공은 최근 환경적으로 사회 이슈가 되는 소음과 진동에 대한 피해와 인접건물에 대한 영향 등을 최소화하기 위해 주변마찰력을 최대한 이용할 수 있는 항타파일(driven pile) 대신에 오거를 이용해 천공한 후 파일의 선단부를 지지층까지 안착시켜 선단에서의 지지력을 최대한으로 확보할 수 있는 선단지파형파일이 주종을 이루고 있다고 할 수 있다. 이러한 선단지파형파일의 지지층은 국내의 경우 일반적으로 풍화암 또는 연암으로 이루어져 있으나 본 연구에서는 파일의 선단부가 사질토 지반에 지지된다고 가정하였다.

이러한 사질토 지반은 실제의 흙이 아닌 2차원 평면변형률 조건을 만족하는 알루미늄 봉으로 모사하여 파일-터널굴착 상호거동에 대한 실내모형실험을 수행하였다.

Lee & Bassett(2007)은 2차원 모형실험과 수치해석을 통해 사질토 지반에서 터널굴착으로 인한 선단지파일의 침하에 따른 영향권을 그림 2와 같이 제안하였다. 이러한 영향권은 지반조건과 더불어 파일 선단부의 위치, 크기, 형상, 선단지지력 등에 의해 크게 영향을 받는다고 보고한바 있다.

선단지파형파일의 선단부 위치에 따라 이론적으로 예상되는 전단변형률의 형상은 그림 3에서 보는 바와 같이 두 개의 차별화된 형태로 구분할 수 있다. 그림 3(a)의 상호적인 전단거동 형태는 터널굴착으로 인해 직접적으로 영향을 받는 선단지파형파일이 수동파일의 거동을 나타내며 지지력이 감소한다는 사실과 관련이 있으며, 다른 하나는 이와는 대조적으로 터널굴착으로 인한 영향을 전혀 받지 않는 독립적인 형태의 선단지파형파일로 그림 3(b)에서 보듯이 터널과 파일의 전단거동이 각각 독립적이라고 할 수 있다.

한편, 실제 터널굴착에 의한 지중응력변화와 이로 인한 터널주변 수동파일의 거동은 매우 복잡한 3차원 문제라고 할 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 복잡한 3차원 거동을 2차원인 평면변형률 조건으로 단순화하여 모형실험 및 수치해석을 수행하였다.

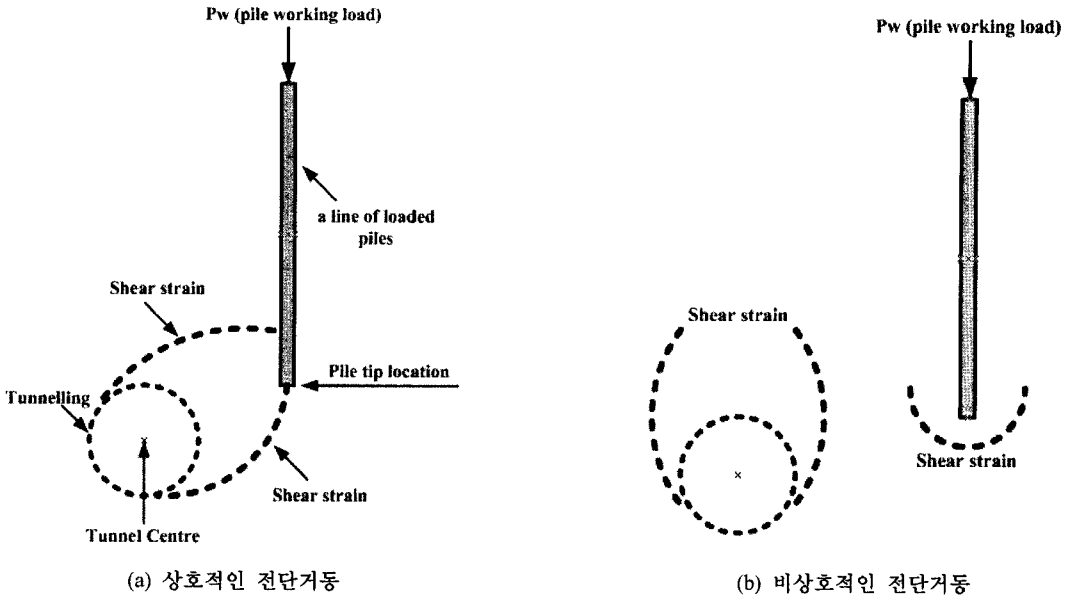


그림 3. 터널굴착으로 인한 선단지파일의 이론적 예상 전단거동

## 2. 실내모형실험

### 2.1 실험 개요

실제 터널굴착으로 인한 지반거동은 3차원이나 본 실험에서는 2차원 평면변형을 조건에서 축소모형실험을 수행하였다. 축소모형실험의 가장 큰 단점인 지중에서의 실제 응력에 대한 모사가 불가능하다는 점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사용하는 원심모형실험이 있으나 비용이 워낙 고가이다 실험에 소요되는 시간에 비해 준비작업과 기타 계측기 설치에 어려움 등으로 인해 제한적인 요소가 많다. 이와는 대조적으로 본 연구에서는 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉과 근거리 사진계측기법을 이용하여 터널굴착단계에 따른 지반변형과 파일에 대한 거동을 손쉽게 파악할 수 있다.

### 2.2 실험 장비

모형터널 및 파일은 그림 4에서 보는 바와 같이 가로 폭: 910 mm, 세로 높이: 720 mm, 길이 폭: 75 m인 강재 프레임(steel test frame) 안에 설치된다. 모형파일 선단부의 위치는 터널의 중심점을 기준으로 A( $1d_0 = 100$  mm), B( $1.5d_0 = 150$  mm), C( $2d_0 = 200$  mm), D( $3d_0 = 300$  mm)에 각각 위치하며 폭은 25 mm이다. 이 때 작

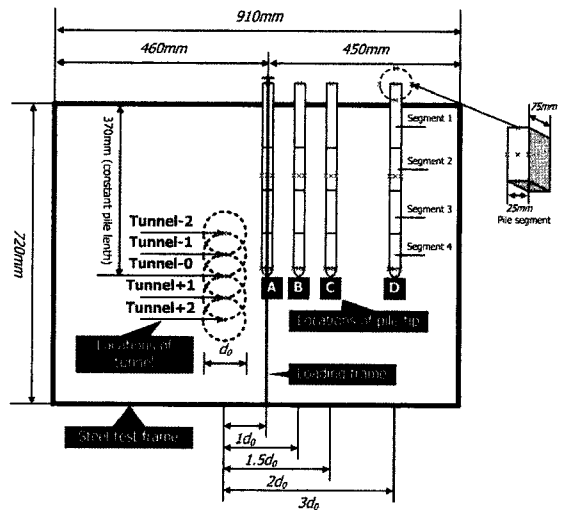


그림 4. 파일-지반-터널굴착 상호거동 모형실험 개요

용하는 하중은 하중재하프레임(loading frame)을 통해 전달된다. 모형터널은 지표면으로부터 370 mm에 중심이 위치하는 Tunnel-0을 기준으로 -2에서부터 +2까지 상하로 위치한다. 참고로 파일-지반-터널굴착에 대한 상호작용은 다양한 변수가 많아 임의적인 상사법칙을 설정하기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구는 2차원 평면

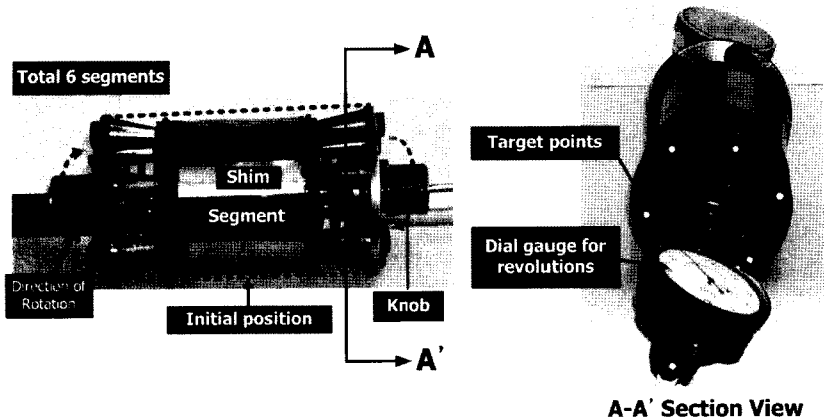


그림 5. 2차원 지름축소식 모형터널 장비

변형을 조건을 만족하는 터널과 파일에 대한 거동을 근거리 사진계측기법을 적용하여 응력보다는 변위 data를 생성하는데 초점을 두었다.

모형터널은 그림 5에서 보는 바와 같이 외경이 축소되는 원통형 실린더 장비를 고안하였다. 터널굴착에 대한 모사는 실린더 양쪽 끝에 부착되어 있는 노브를 돌리면서 다이얼게이지의 눈금에 따라 원하는 외경을 축소할 수 있다. 기존의 고무튜브를 사용하여 공기압을 줄여 나가는 방식에 비해 훨씬 간편하게 터널 주변 지반의 응력을 이완시킬 수 있는 특징이 있다. 특히 터널파괴에 상응하는 변위를 줄 수 있어 뚜렷하고 선명한 지반의 전단 파괴메카니즘을 생성하는데 매우 유용하게 사용된다.

사질토 지반을 모사하기 위해 실험에 사용한 알루미늄 봉은 그림 6에서 보는 바와 같이 직경이 2 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, 20 mm의 6개로 구성되어 있다. 이 중 상대적으로 직경이 작은 2 mm와 3 mm는 파일과 터널의 주변 및 이들 사이에 집중적으로 배치하였다. 나머지는 터널굴착으로 인한 영향이 거의 없는 지역에 배치하였다.

이러한 알루미늄 봉의 장점은 재료의 재사용이 가능하여 반복적인 실험이 가능하며 재료를 셋팅하는 시간이 상대적으로 실제 모래에 비해 빠르기 때문에 실험에 소요되는 시간이 짧다. 이와 더불어 지반구조물의 크기 및 위치 등 다양한 경우에 대한 실험이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 국내에서는 신중호 등(2005)이 탄소봉을 이용하여 비점착성 지반에서 터널굴착으로 인한 굴

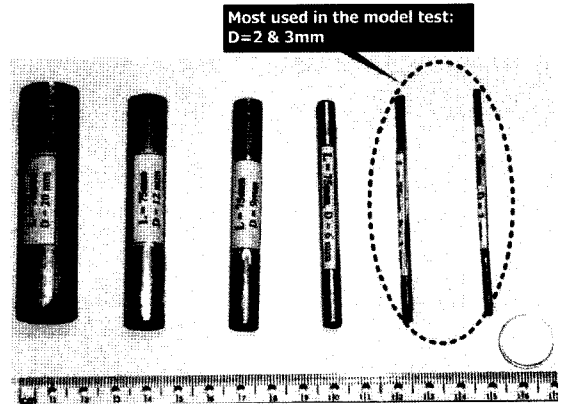


그림 6. 모형실험에 사용된 다양한 직경의 알루미늄 봉 재료

착면 파괴모드를 제시하였는데 두 재료가 가지는 서로 다른 특성을 제외하고는 위에서 언급한 특징과 공통되는 점이 많다고 할 수 있다.

### 2.3 파일-지반-터널굴착 모형실험

선단지파일-지반-터널굴착 모형실험은 모형터널의 중심을 기준으로 파일 선단부의 위치에 따라 +2 시리즈(A+2, B+2, C+2, D+2), +1 시리즈(A+1, B+1, C+1, D+1), 0 시리즈(A0, B0, C0, D0), -1 시리즈(A-1, B-1, C-1, D-1), -2 시리즈(A-2, B-2, C-2, D-2), 총 20 경우에 대해 실험을 수행하였다(그림 7 참조).

모형실험 과정은 크게 3단계로 이루어지며 1단계는 준비단계로 알루미늄 봉과 모형파일을 계획한 위치에

배치시킨다. 이 때 모형파일과 모형터널 주변 및 사이에 사진계측용 비드마크(bead mark)가 부착된 알루미늄 봉도 함께 배치시킨다. 2단계는 1단계의 모든 배치가 완료된 후 모형파일에 하중을 재하 시키는 단계다. 이때의 하중은 정적하중으로 하중재하프레임을 통해 모형파일 머리 부분에 하중을 전달시킨다. 참고로 본 실험에 앞서 모형파일에 대한 하중재하시험을 수행하여 모형파일에 작용하는 극한하중과 변위 관계를 규명하였다. 이로부터 모형파일에 작용하는 하중을 결정하였다. 하중 결정에 대한 내용은 다음 장에서 설명한다. 3단계는 터널굴착 단계로 다이얼게이지 눈금 회전수(n)로 인한 모형터널의 축소된 반지름( $\Delta R_s$ )을 적용해 지반손실( $V_L$ )을 계산하였

다. 계산 결과,  $n-\Delta R_s-V_L$  관계는 비선형으로 나타났다. 참고로  $n=2$ 인 경우  $V_L=3.94\%$ ,  $n=4$ 인 경우  $V_L=7.63\%$ ,  $n=6$ 인 경우  $V_L=10.94\%$ ,  $n=9$ 인 경우  $V_L=15.21\%$ ,  $n=12$ 인 경우  $V_L=18.65\%$ 이다.

### 2.4 근거리 사진계측기법

본 모형실험에 적용된 근거리 사진계측기법은 기존의 전통적인 LVDT나 기타 게이지 등이 측정하는 방식인 재료에 직접 접촉하는 것과는 대조적으로 알루미늄 봉 표면에 부착되어 있는 비드마크에 대한 이미지를 디지털카메라를 이용해 다양한 위치 및 각도에서 촬영한 다음 촬영한 여러 이미지를 VMS(Vision Measurement System) 이미지프로세싱 프로그램을 사용해 비드마크의 위치를 찾아낸 다음 각 비드마크에 대한 삼각요소망을 EngVis 프로그램을 사용해 생성한다(그림 8 참조). 한편 이러한 과정을 실험단계별로 수행한 다음 최종적으로 초기단계에서의 위치와 단계별 위치와의 차이를 계산하면 초기치 대비 단계별 지반변위를 계산할 수 있다. 따라서 측정 시 재료와의 접촉이 필요 없는 편리하면서도 정밀도가 매우 높은 기법이다. 측정된 3개의 점에 대한 변위로부터 본 연구의 핵심인 전단변형률을 계산할 수 있다. 이러한 근거리 사진계측기법 및 이미지프로세싱은 터널 깊이별 굴착에 따른 지반거동에 대한 모형실험에 성공적으로 적용되어 그 유용성을 검증하였다(Lee and Bassett, 2006).

본 모형실험과 관련한 실험 단계별 과정과 이미지 캡처(capture) 단계는 그림 9와 같다. 실험 단계는 크게 3

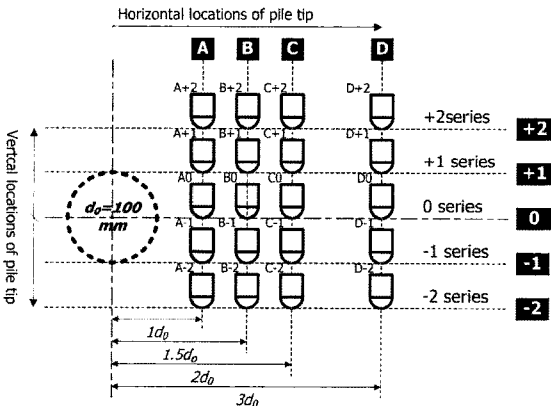


그림 7. 모형터널 중심을 기준으로 하는 모형파일 선단부의 위치

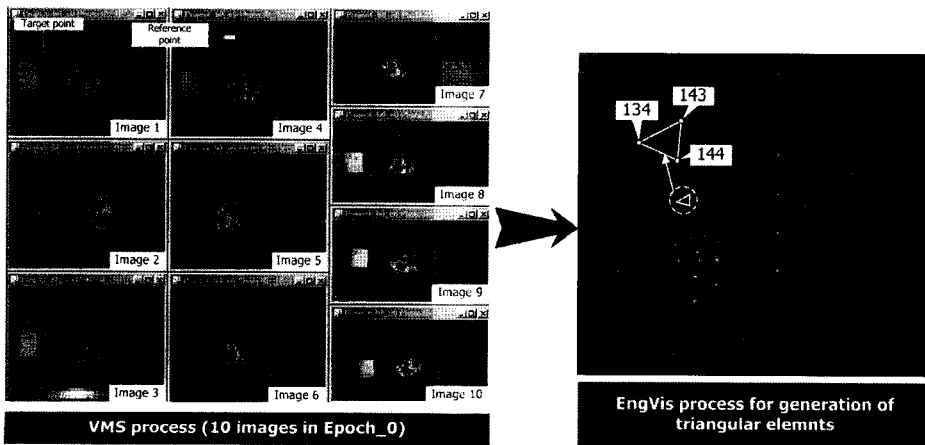


그림 8. 근거리 사진계측 및 이미지프로세싱

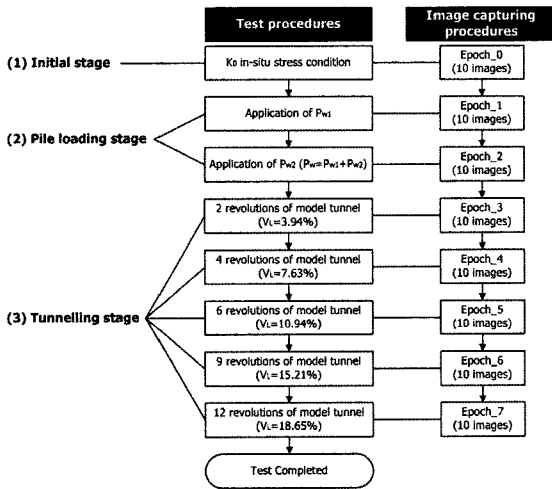


그림 9. 근거리 사진계측 및 이미지프로세싱

단계로 구성되며 이에 따른 세부적인 이미지 캡처 단계인 Epoch은 초기단계인 Epoch\_0을 포함해 총 8단계로 구성된다. 따라서 하나의 파일-지반-터널굴착 상호거동 모형실험에 요구되는 총 이미지는 80개이며 이때의 픽셀(pixel)에 대한 해상도는 1702x1200이다. 참고로 사진계측에 사용된 카메라의 사양은 Kodak DC 290 디지털카메라가 사용되었고 사진을 촬영할 때 반드시 강재 프레임 표면에 부착되어 있는 25개의 기준점 비드마크를 포함해 촬영해야 한다. 그 이유는 이미지프로세싱에 있어 기준이 되는 25개의 비드마크가 있어야 이를 기준으로 각각의 이미지를 보정하여 최적의 알루미늄 봉 비드마크 위치를 계산할 수 있기 때문이다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석 개요

파일-지반-터널굴착 상호거동은 매우 복잡한 경계치 문

제로 이를 효과적으로 분석하기 위해서는 유한요소해석이 필요하다. 2차원 모형실험을 수치해석으로 모사하기 위해 상용프로그램인 CRISP 프로그램을 사용하였다(Britto and Gunn, 1987, Woods and Rahim, 2001). 본 프로그램은 연약지반에 대해 다양한 구성모델의 Library를 가지고 있어 지반의 거동특성인 응력-변형을 관계를 규명하는데 매우 유용하게 사용할 수 있다. 하지만 3차원 메쉬(mesh)생성 프로그램이 취약해 주로 2차원 해석에 머물고 있는 실정이다.

#### 3.2 해석 조건

해석에 적용된 지반은 탄성계수(E)와 점착력(c)이 지반의 깊이에 따라 선형적으로 증가하는 Gibson 모델이며 구성모델은 Non-associated plastic flow rule의 지배를 받는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 모형파일은 강성이 큰 콘크리트 탄성체로 가정하였으며 모형터널의 경계면은 2절점 Bar 요소로 모델링하였다. 지반, 모형파일 및 터널 경계면의 물성치를 정리하면 표 1과 같다.

비선형 응력-변형을 거동을 계산하기 위해 FNR(Full Newton-Raphson) 증분 방법이 사용되었고 이 때 힘과 변위의 수렴오차는 0.05(5%)와 반복계산 수는 100으로 설정하였다. 또한 초기응력 조건인  $K_0 = 0.66$  값으로 초기평형조건을 만족하였다. 그림 10은 모형실험을 모사한 전형적인 유한요소망과 경계조건을 나타낸다. 모형파일은 8개의 절점을 가지는 LSQ(Linear Strain Quadrilateral) 요소로 모델링하였으며 지반은 6개의 절점을 가지는 LST(Linear Strain Triangular) 요소로 모델링하였다.

지름 축소식 모형터널 굴착에 대한 모사는 그림 11과 같이 크게 4단계로 이루어진다. 1단계는 초기단계로 모형터널의 외경이 축소되기 전의 절점을 나타내며 2단계는 모형터널의 외경이 축소된 값( $\Delta R_s$ )을 계산하여 터널 경계면 모든 절점에 적용하는 단계이다. 3단계는 수동과

표 1. 지반, 모형파일 및 터널 경계면의 물성치

재료	c'(kPa)	v	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)	$E_0$ (kPa)	$m_E$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$Y_0$ (m)
지반	0.1	0.35	23	15	1,600	10,000	24	0.72
파일	-	0.2	-	-	$1.55 \times 10^7$	-	23	-
터널*	-	0.2	-	-	$1.55 \times 10^7$	-	-	-

c': 점착력, v: 포아송비,  $\phi$ : 내부마찰각,  $\psi$ : 팽창각,  $E_0$ : 지표면에서 탄성계수,  $m_E$ : 탄성계수 기울기,  $\gamma$ : 단위중량,  $Y_0$ : 지표면 위치, \*터널 경계면 Bar 단면적: 0.003 m<sup>2</sup>

일의 영향으로 인해 모형터널의 중심이 아래쪽으로 움직이는 값( $\Delta Y_{tc}$ )을 터널 경계면 모든 절점에 적용한다. 3단계부터는 사진계측을 통해서 얻은 모형터널 주변 모든 비드마크의 변위 값을 사용한다. 마지막으로 4단계에서는 3단계와 같은 방법으로 모형터널의 중심이 왼쪽으로 움직이는 값( $\Delta X_{tc}$ )을 터널 경계면 모든 절점에 적용한다. 본 연구에 적용된 터널굴착 모사방법은 모형터널 장비와 사진계측에서 측정된 실제의 변위 값을 터널 경계면 모든 절점에 적용하므로 Cheng et al.(2007)이 제안한 DCM에 비해 보다 정확한 지반거동을 파악할 수

있다는 특징이 있다. 이러한 변위제어에 의한 터널굴착을 모사하는 방법인 DCM은 기존 하중제어에 의한 방법인 FCM에 비해 지반거동에 대한 예측을 보다 정확하게 할 수 있다는 사실을 본 연구를 통해 확인하게 되었다.

### 3.3 파일의 선단하중 결정

모형파일에 작용하는 하중  $P_w$ 을 결정하기 위해 하중 재하시험 및 수치해석을 수행하였다. 시험 및 수치해석 결과, 하중-변위에 대한 관계(P-S curve)는 그림 12와 같다. 모형파일의 극한하중( $P_u$ )은 4.7 kN으로 나타났다. 본 연구 목적상 터널굴착과 수동파일 사이 지반의 뚜렷한 전단거동을 사진계측으로 측정하기 위해 모형파일에 작용하는 하중을 극한하중의 약 80%인 3.6 kN으로 결정하였으며 이를 단위 면적당 응력으로 계산하면 144 kPa이다. 일반적인 설계에 있어 파일의 허용하중은 극한하중에 대해 안전율 3을 적용하나 본 실험의 경우 안전율은 약 1.3 정도로 낮게 설정하였다. 참고로 그림 11에서 LCM은 모형파일 하중재하시험에서 모형파일 머리(head) 부분의 가운데 절점을 통해 점진적인 하중 재하로 파일의 침하를 유도하는 방법이며 이와는 대조적인 DCM은 점진적인 변위를 적용하여 파일의 침하를 유도하는 방법이다. 한편 수치해석에 있어서는 LCM이 아닌 DCM을 통해 모형실험 결과에 잘 맞는 만족스러운 결과를 얻었다.

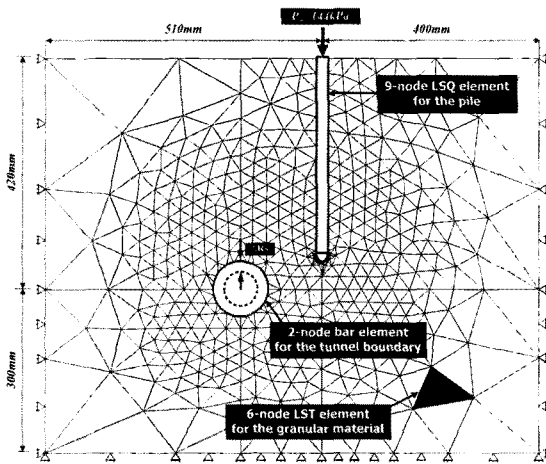


그림 10. 2차원 파일-지반-터널굴착 유한요소망

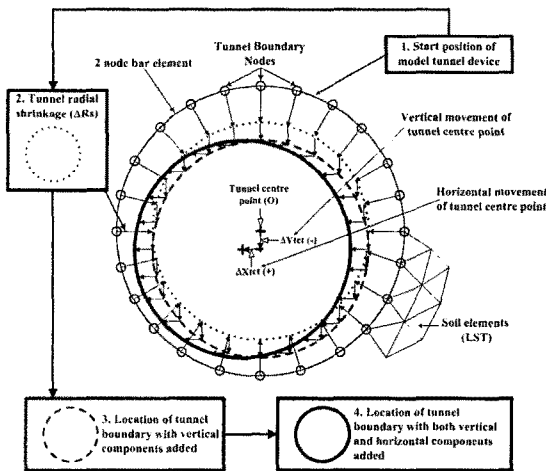


그림 11. 실제 측정된 변위 값을 터널 경계면 절점에 적용하여 터널굴착을 모사

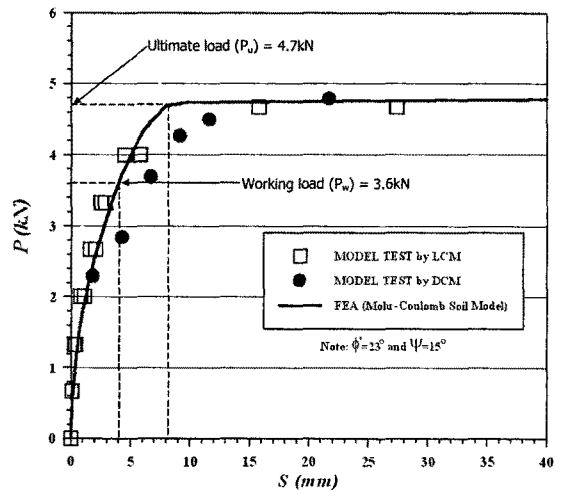
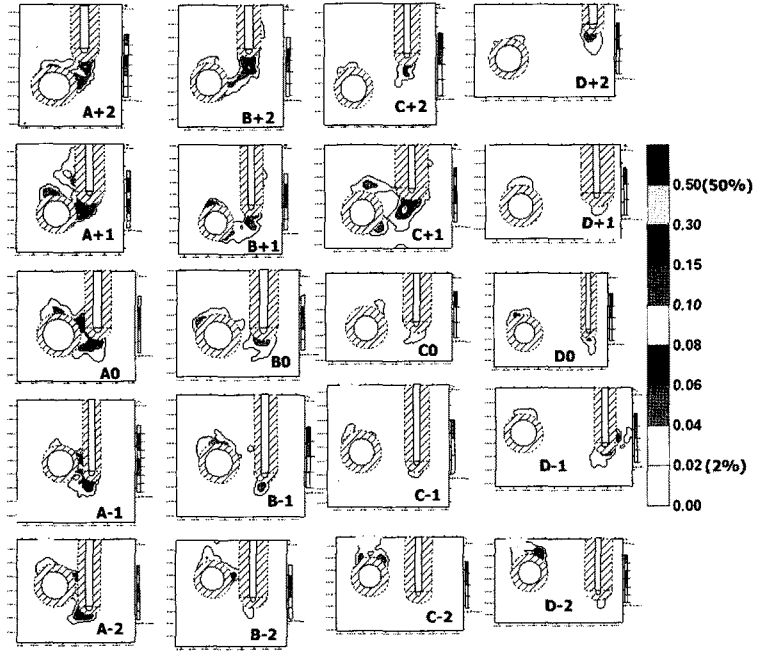
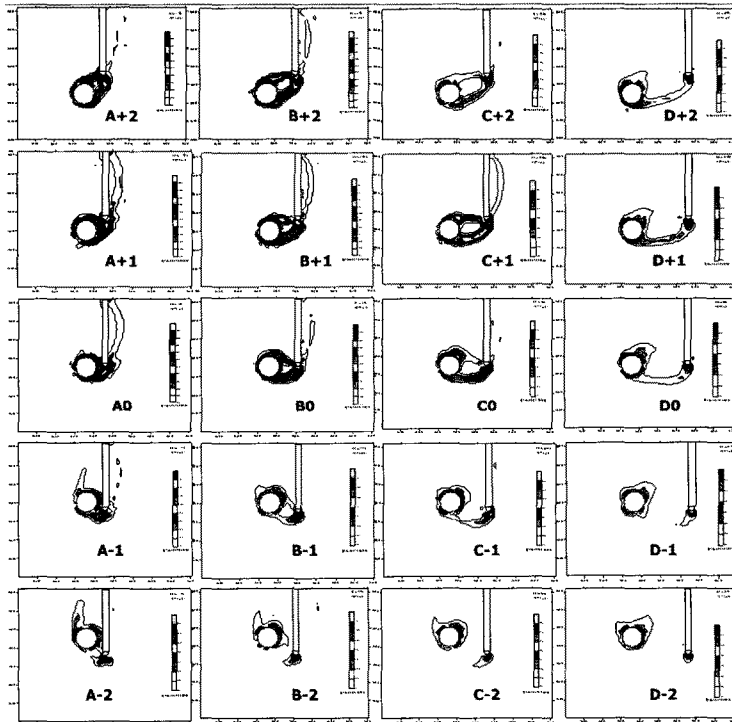


그림 12. 모형파일에 대한 하중-침하(P-S) 관계 곡선



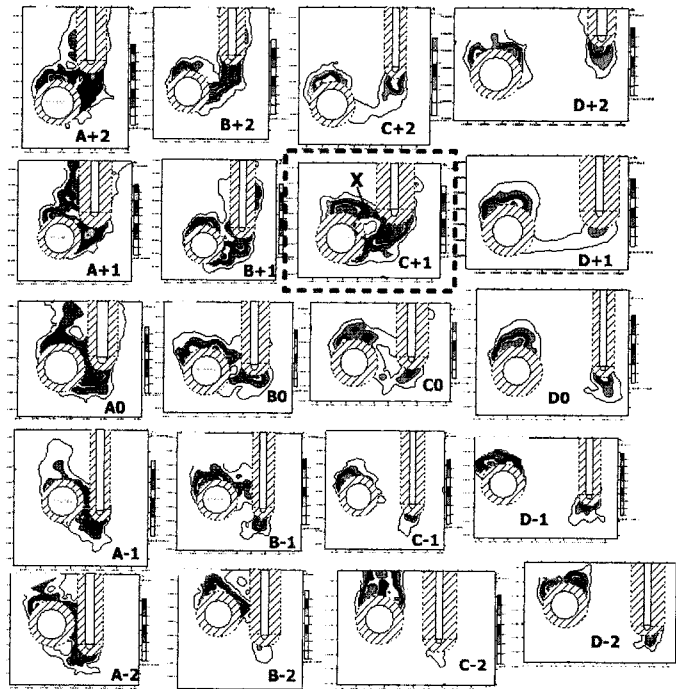
(a) 모형실험



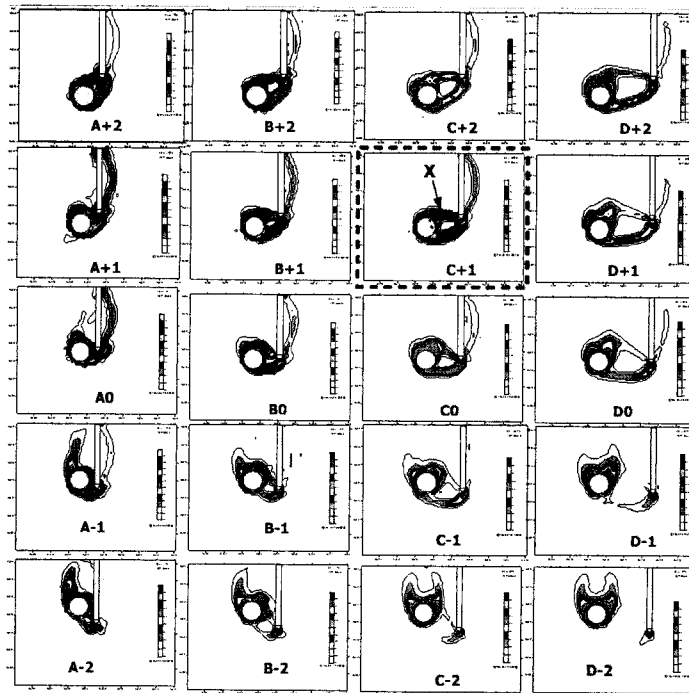
(b) 수치해석

그림 13. 최대 전단변형률 비교( $V_L=3.94\%$ )





(a) 모형실험



(b) 수치해석

그림 14. 최대 전단변형률 비교( $V_L=10.94\%$ )

#### 4. 모형실험과 수치해석 비교

서론에서 언급한 이론적으로 예상되는 전단변형률 형성에 대한 두 가지 형태(상호적인 전단거동과 비상호적인 전단거동)를 규명하기 위해 모형실험과 수치해석에서 얻은 최대 전단변형률을 지반손실  $V_L = 3.94\%$ 와  $V_L = 10.94\%$ 인 각각의 경우에 대해서 비교하면 그림 13과 14와 같다. 여기서, 상호적인 전단거동은 전단변형이 파일의 선단부에서 시작해 터널의 스프링부와 연결되는 형태와 더불어 터널의 상부 크라운부에서 시작해 파일 하부 주변에 연결되는 형태가 합성이 된 것을 의미하는 반면에 비상호적인 거동은 파일과 터널의 전단변형이 각각 독립적으로 나타나는 형태를 의미한다.

그림 13과 14를 통해 최대 전단변형률은 모형실험과 수치해석 모두 공통적으로 파일 선단부와 터널의 크라운부에서 지반손실이 증가함에 따라 지속적으로 발전해 나가는 것을 알 수 있다. 그림 13에서 보듯이 지반손실이 비교적 작은 경우의 모형실험에 있어서 상호적인 전단거동에 해당되는 파일 선단부의 위치는 A+2, A0, A-1, C+1이며 수치해석은 A+2, A+1, A0, A-1, B+2, B+1, B0, C+2, C+1, C0으로 나타났다. 지반손실이 큰 경우 그림 14에서 보듯이 상호적인 전단거동은 더욱 뚜렷하

게 발전해 나가는 것을 확인할 수 있다. 모형실험에 있어 상호적인 전단거동에 해당되는 파일 선단부의 위치는 A+2, A+1, A0, A-1, A-2, B+2, B+1, B0, C+1, C0이며 수치해석은 A+2, A+1, A0, A-1, A-2, B+2, B+1, B0, C+2, C+1, C0로 나타났다. 상호적인 전단거동의 특징은 그림 14의 C+1에서 보듯이 전단변형률이 아주 작거나 0인 중립블록인 X가 존재한다는 것이다(이용주, 2007).

앞에서 언급한 상호적인 전단거동과 비상호적인 전단거동을 파일의 선단부 위치에 따라 구분하며 그림 15와 같다.

#### 5. 결 론

본 연구는 기존 선단지파일에 인접하여 터널굴착시 발생하는 사질토 지반의 상호적인 전단거동과 비상호적인 전단거동을 분석하기 위해 2차원 모형실험과 더불어 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 변위제어에 의한 터널굴착을 모사하는 방법인 DCM은 기존 하중제어에 의한 방법인 FCM에 비해 지반거동에 대한 예측을 보다 정확하게 할 수 있다는 사실을 확인하였다.
2. 최대 전단변형률은 모형실험과 수치해석 모두 공통적으로 파일 선단부와 터널의 크라운부에서 지반손실이 증가함에 따라 지속적으로 발전해 나가는 것을 알 수 있다.
3. 상호적인 전단거동은 전단변형이 파일의 선단부에서 시작해 터널의 스프링부와 연결되는 형태와 더불어 터널의 상부 크라운부에서 시작해 파일 하부 주변에 연결되는 형태가 서로 합성된 구조이며 이와는 대조적으로 비상호적인 전단거동은 파일과 터널의 전단변형이 각각 독립적으로 발전되는 형태임을 확인하였다.
4. 두 개의 뚜렷한 전단거동은 선단지파일의 규격 및 선단부의 위치에 매우 의존적임을 알 수 있다. 사질토 지반에서 터널굴착시 지반손실이 크게 발생할 때 파일의 선단부 위치가 그림 15의 ②인 비상호적인 전단거동에 해당되는 경우, 파일을 포함한 상부구조물의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 이러한 영역은 Lee and Bassett(2007)이 제안한 터널굴착으로 인한 파일의 침하영향권과 관련 영역 3과 4에 해당된다고 할 수 있다(그림 2 참조).

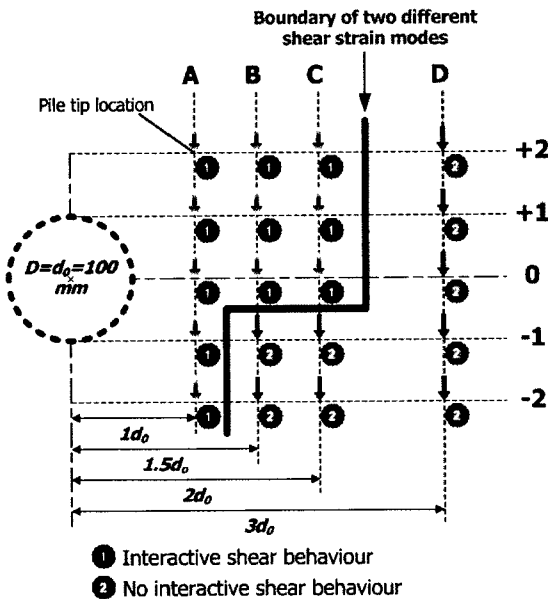


그림 15. 상호적인 전단거동과 비상호적인 전단거동 경계선

본 연구에서는 건조된 사질토 지반에 대해서만 그 거동을 분석을 하였지만 실제 지반조건은 다양한 지층 및 지하수 등의 영향으로 인해 더욱 복잡할 것으로 판단된다. 따라서 향후 김상환(2003)이 언급한 유효응력개념에 근거하여 배수 및 비배수 상태를 구분하여 파일-지반-터널굴착에 대한 상호거동을 검토해야 할 것으로 판단되며 이와 더불어 3차원 해석을 통해 터널굴착에 따른 실제 거동에 대한 분석도 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 김상환 (2003), “토사터널굴진시 지반거동에 대한 이론적 접근에 대한 연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 5, No. 4, pp. 301-312.
2. 신중호, 권오엽, 조재완, 최민구 (2005), “비점착성 지반의 지하공간 굴착면 파괴모드에 대한 연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 3, pp. 197-207.
3. 이용주 (2007), “파일하중에 따른 터널주변의 지반거동 연구”, 대한토목학회 논문집, Vol. 27, No. 5C, pp. 363-371.
4. Bezuijen, A. and van der Schrier, J. S. (1994), “The influence of a bored tunnel on pile foundations”, Centrifuge '94, Lee and Tan (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 681-686.
5. Britto, A. M. and Gunn, M. J. (1987), Critical state soil mechanics via finite elements, Ellis Horwood Ltd.
6. Cheng, C. Y., Dasari, G. R., Y. K. Chow and Leung, C. F. (2007), “Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 450-466.
7. Hergarden, H. J. A. M., van der Poel, T. J., and van der Schrier, J. S. (1996), “Ground movements due to tunnelling: influence on pile foundations, Mair and Taylor (eds.)”, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, London, pp. 681-686.
8. Jacobsz, S. W. (2002), The effects of tunnelling on piled foundations, PhD Thesis, University of Cambridge.
9. 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.
10. Lee, Y. J. (2004), Tunnelling adjacent to a row of loaded piles, PhD Thesis, University College London.
11. Lee, Y. J. and Bassett, R. H. (2006), “Application of a photogrammetric technique to a model tunnel”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 79-95.
12. 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, Vol. 22, No. 3, pp. 325-342.
13. Loganathan, N., Poulos, H. G. and Stewart, D. P. (2000), “Centrifuge model testing of tunnelling induced ground and pile deformations”, Geotechnique, Vol. 50, No. 3, pp. 283-294.
14. Morton, J. D. and King, K. H. (1979), “Effect of tunnelling on the bearing capacity of and settlement of piled foundations, Jones, M. J. (eds.), Proceedings of tunnelling 1979, IMM, London, pp. 57-68.
15. Mroueh, H. and Shahrour, I. (2002), “Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunnelling and pile foundation”, Int. J. Numer. Anal. Mech. Geomech., Vol. 26, pp. 217-230.
16. Potts, D. M. and Zdrakovic, L. (1999), Finite element analysis in geotechnical engineering - Theory, Thomas Telford.
17. Woodhouse, R. and Rahim, A. (2001), SAGE-CRISP technical manual, Ver. 4, CRISP Consortium Ltd.



이 용 주

포항산업과학연구원  
토목연구본부  
선임연구원

E-mail: ucesyj199@rist.re.kr