

파일-흙-터널의 상호거동에 따른 영향권

Influence Zones subjected to Pile-Soil-Tunnelling Interaction

이용주¹⁾, Yong-Joo Lee, R. H. Bassett²⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

²⁾ Reader in Geomechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, University College London, University of London

SYNOPSIS : New construction for public transport in congested urban areas will involve tunnel construction adjacent to existing building or bridge foundations and services due to the lack of surface space. Therefore, careful assessment of the important underground structure-soil-tunnelling interaction is relatively new, currently only limited information is available. In this study, the authors carried out FE analysis and the laboratory model test using the photogrammetric technique and suggested the influence zones associated with the normalised pile tip settlement during new tunnel construction.

Key words : 구조물-흙 상호거동, FEA, 실내모형실험, 사진계측, 침하영향권

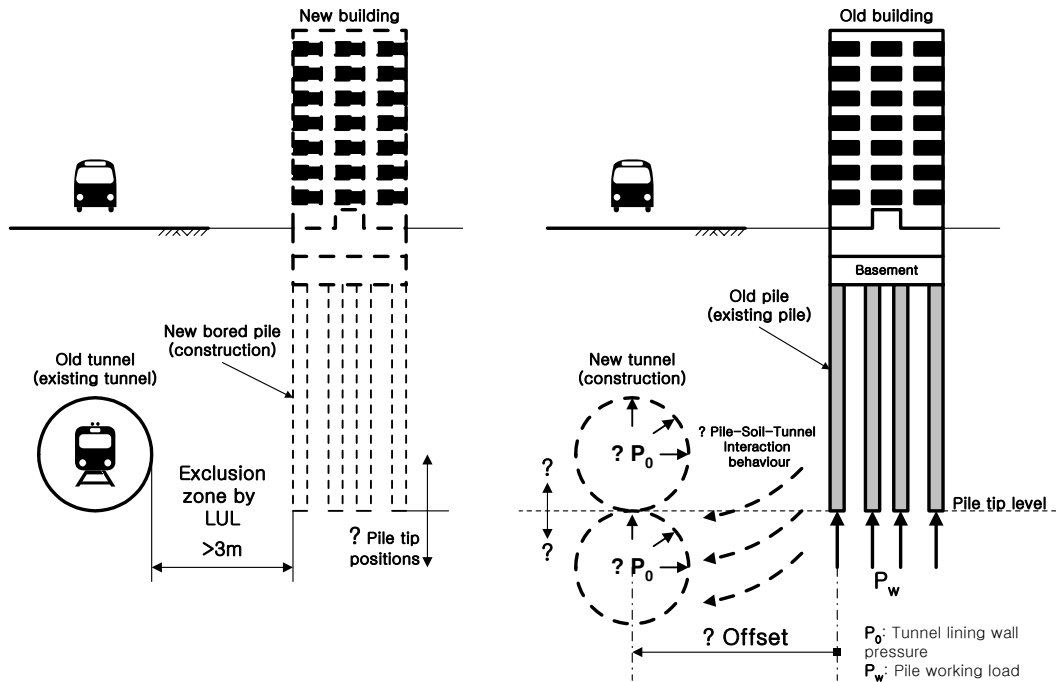
1. 서 론

도심지 교통난을 해소하기 위한 일환으로 현재 지하철과 같은 지하공간에서 대중교통의 개발이 사회 기반시설의 개발확대라는 정부시책에 부합하여 꾸준히 증가하고 있으며, 이로 인해 많은 문제점들이 야기되고 있다. 특히 도심지 지하 터널 공사로 유발되는 지반거동으로 인해 인접구조물의 안정성 및 손상 등이 민원문제, 공사지연, 건설비증가 등으로 이어지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 빌딩의 깊은 파일기초에 근접하여 터널을 굴착할 경우 생기는 파일-흙-터널의 상호거동에 대한 기본적인 이해를 위해 수치해석 및 사진계측을 도입한 실내모형실험을 각각 실시하였다. 또한 터널 굴착으로 인한 파일의 거동을 수치해석 및 실내모형실험에서 얻어진 결과와 비교·분석하였다. 마지막으로 파일의 수직변형 데이터를 기반으로 하여 기존 파일에 인접하여 터널을 굴착할 경우, 그 영향권을 제안하였다. 이러한 영향권은 앞으로 지반공학 실무자들이 기존 파일에 인접하여 터널을 계획 및 시공할 경우에 대비하여 효율적인 판단 자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

2. 터널굴착으로 인한 기존의 영향권 고찰

일반적으로 도심지에서 흔히 발생하는 두 가지 경우는 (a) 기존의 터널에 인접하여 파일을 시공할 경우(그림 1(a))와 (b) 기존의 파일기초에 인접하여 터널을 시공하는 경우가 있다(그림 1(b)). 본 연구에서는 그림 1(b)와 관련하여 터널 굴착시 생기는 지반거동이 기존 파일에 미치는 영향에 대해서 주안점을 두었다. 본 연구와는 대조적으로 그림 1(a)와 관련하여서는 Schroeder, Potts and Addenbrooke

(2004) 등이 그룹파일에 작용하는 하중에 의해서 변형되는 인접한 기존 터널을 수치해석을 실시하여 규명하였다.



(a) 기존 터널에 인접하여 새로운 파일 시공 (b) 기존 파일에 인접하여 새로운 터널 굴착
그림 1. 도심지에서 흔히 발생하는 두 가지의 경우

그림 1(a)에서 보는 바와 같이 LUL (London Underground Limited)에서는 자신의 터널을 보호하기 위해 Bored 파일의 경우 터널의 이격거리를 3m로 지정하고 있으며, 또한 Driving 파일의 경우에는 Bored 파일의 5배인 15m로 규정하고 있다. 이러한 이격거리는 정량적 해석보다는 주로 정성적 해석에 크게 의존하고 있는 실정이다.

터널 굴착으로 인해 영향을 받는 영역은 그림 2에서 보는 바와 같이 전통적으로 터널의 주동 파괴면인 $45^\circ + (\phi/2)$ 를 기준으로 결정되어 왔다.(Cording and Hansmire, 1975; Attewell, 1977; Attewell et al., 1986) Morton and King(1979)은 실내모형실험을 실시하고 파일 기초에 극적인(critical) 영향을 제안했다. 근래에 와서는 캄프리지대에서 Jacobsz 등(2001)이 원심분리실험(Centrifuge model test)을 실시하고 파일 기초에 극적으로 영향을 미치는 영향선을 터널축으로부터 60° 로 규정하였으며, 더불어 큰 파일 침하가 기대되는 영향선을 터널축으로부터 45° 로 규정하였다. 실제 실무에 있어서는 그림 2에 나타난 β 라인(line)을 기준으로 하여 터널 굴착시 인접구조물의 안정성 확보를 위하여 반드시 위에서 제시한 β 라인(line)에서 벗어나 있도록 터널을 계획·설계하고 있는 실정이다.(Attewell, 1986)

본 연구에서는 파일 팁(tip)을 기준으로 하여 터널의 상·하 위치 변화 및 수·평 위치 변화에 따른 파일의 거동을 사진계측을 이용한 실내모형실험을 통해 규명해 보고, 아울러 실내모형실험에서 얻어진 변위 데이터를 역으로 상용FE 프로그램인 SAGE CRISP에 적용하여 여기서 얻어진 결과를 실내모형실험에서 얻어진 결과와 비교·분석하였다. 이러한 실내모형실험 및 수치해석은 Plane strain 조건에 기반하고 있으며 수치해석에 사용된 매질모델은 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 파괴 모델을 사용하였다. 또한 현실에서는 작게 나타나는 흙의 볼륨 변화량(volume change)을 구현하기 위해서는 Associated flow rule, 즉 $\phi = \psi$ 이 아닌 Non-associated flow rule (or normality)을 Mohr-Coulomb 모델에 적용하였다. 실제 터널의 거동은 3차원 거동이지만 복잡한 지반구조물-흙의 상호거동을 이해하기 쉽게 하기 위해서 실내모형실험 및 수치해석의 2차원 거동으로 단순화시켰다.(Lee, 2004)

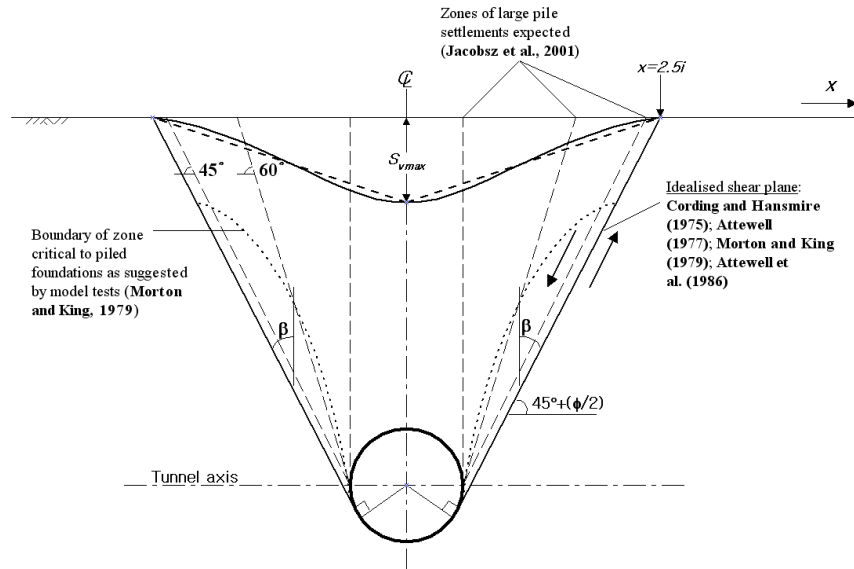


그림 2. 터널 굴착으로 인해 생겨나는 기존의 영향권 고찰

3. 실내모형실험

그림 3과 같이 터널 중심축을 기준으로 총 21개소의 서로 다른 파일 팁의 위치에 대해서 실내모형실험을 실시하였다. 터널 중심축에서 상·하 파일 팁의 위치는 총 5 시리즈(+2, +1, 0, -1, -2)이며 수평방향으로의 파일 팁의 위치는 총 4가지(A, B, C, D)이다. 파일의 폭은 25mm, 길이는 370mm로 고정된 값이며 터널의 지름은 100mm이다.

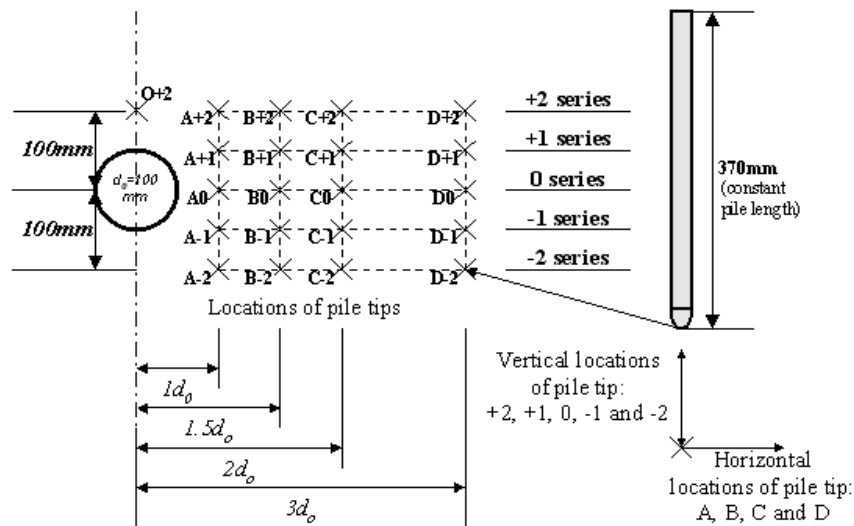


그림 3. 실내모형실험 시리즈

전형적인 실내모형실험, B+1의 셋업(set up)은 그림 4)와 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 사진계측을 위해 스틸 프레임(test chamber) 표면에 총 25개의 기준점을 터널 장비에는 총 6개의 기준점을 각각 설치하였다. 실험순서는 먼저 모형실험 시리즈에 따라 파일과 터널을 각각 원하는 위치에 배치시키고 실버 타겟 포인트(silver target point)가 없는 알루미늄 봉을 랜덤(random)하게 팩킹한다. 이 때 주

의 할 점은 파일과 터널에 인접한 부분에 대해서는 작은 지름의 알루미늄 봉으로 팩킹하고 이 지역을 제외한 나머지 부분에서는 지름이 큰 알루미늄 봉으로 팩킹한다. 팩킹시 재료의 밀도는 조밀한(dense) 상태가 되도록 나무 스틱을 이용해 가볍게 태핑(tapping)하도록 한다. 그림 4에서 보듯이 초기상태(K_0 conditions)에서의 재료의 조밀상태를 나타내는 간극비(이차원에서의 area porosity로 정의)의 값은 0.34 ~ 0.38 이다. 이러한 이차원 간극비는 Yamamoto 등(2001)이 제안한 값과 거의 유사한 것으로 나타났다.

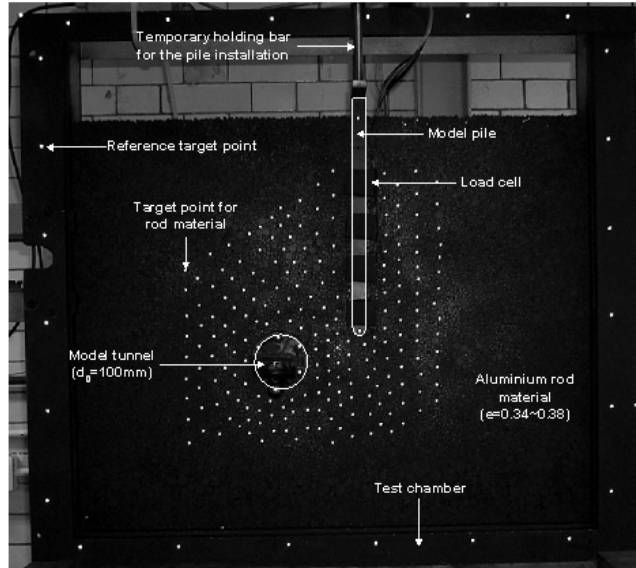
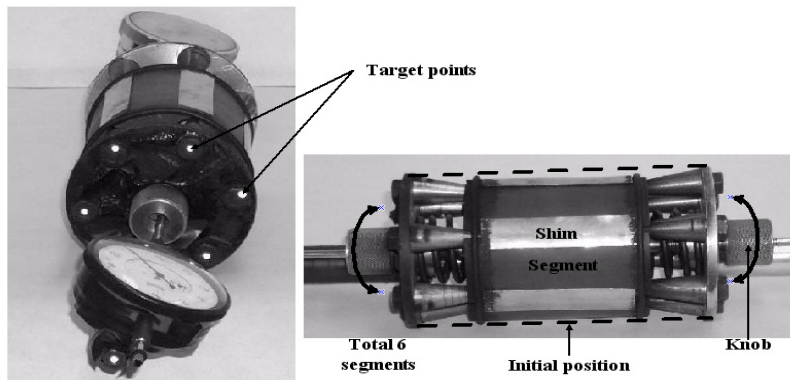


그림 4. 실내모형실험 B+1 경우

그림 5(a)는 실내모형실험에서 사용된 터널장비로 터널 원래의 지름(100mm)을 앞·뒤 두 개의 노브(knob)를 동시에 돌려 나가면서 서서히 그 지름을 앞·뒤에 부착된 다이얼 게이지(dial gauge)를 보면서 축소시켜 나가는 장비이다. 축소된 터널 지름은 터널장비의 칼리브레이션(calibration) 실험을 통해 이차원 지반손실(area loss, V_L , %)로 표현될 수 있다.(Lee, 2004) 실험에서 사용된 재료는 위에서 언급한 알루미늄 봉으로 종방향으로 75mm이며 6개의 각각 다른 지름(20mm, 12mm, 9mm, 6mm, 3mm, 2mm)을 가지고 있다.(그림 5(b)) 따라서 재료를 팩킹(packing)할 때 각각 다른 지름을 서로 혼합시키며 인터록킹(interlocking)에 대한 효과를 기대할 수 있다는 큰 장점이 있다. 아울러 실험시간이 모래에 비해 빠르며, 특히 지반구조물의 파괴 거동을 아무런 제약조건 없이 구현할 수 있다. 예로서 터널과 관련하여 상당히 큰 2차원 지반손실을 생성할 수 있다. 따라서 이러한 재료는 파괴 메카니즘(failure mechanism)을 연구하는데 유용하게 적용될 수 있다.(Lee, 2004)



(a) 터널 장비(지름이 최대 축소된 경우, $V_L=20.5\%$)



(b) 실험에 사용된 알루미늄 봉 재료

그림 5. 실내모형실험에 사용된 터널장비 및 알루미늄 봉 재료

모형실험에서 생기는 변형 데이터(deformation data)를 추출하기 위해 사진계측 테크닉(photogrammetric technique)을 적용시켰다. 그림 6은 전형적인 사진계측 과정을 순서도로 나타낸 것이다. 이러한 사진계측은 전통적인 LVDT 측정 시스템에 비해 정밀도가 매우 높으며 재료에 전혀 손이나 기타 측정 도구들이 닿지 않아 매우 편리하게 변형 데이터를 실험 동안 얻을 수 있는 특징이 있다.(Lee, 2004) 위에서 얻어진 변형 데이터는 UCL Soil Mechanics Group에서 개발한 PC용 변위 프로그램(strain program) - 선형 변위 삼각형(a linear strain triangular element)에 기반 - 이용해 변형 벡터(x-y displacement vectors), 수평 변형(horizontal displacement), 수직 변형(vertical displacement), 주응력 방향(principal stress or strain directions), 슬립라인 방향(slip line or zero extension directions), 최대 전단변위(maximum shear strain), 볼륨 변위(volumetric strain)를 생성할 수 있다. 이러한 사진계측의 프로세스에 대한 전체적인 순서도는 다음의 그림 5와 같다.

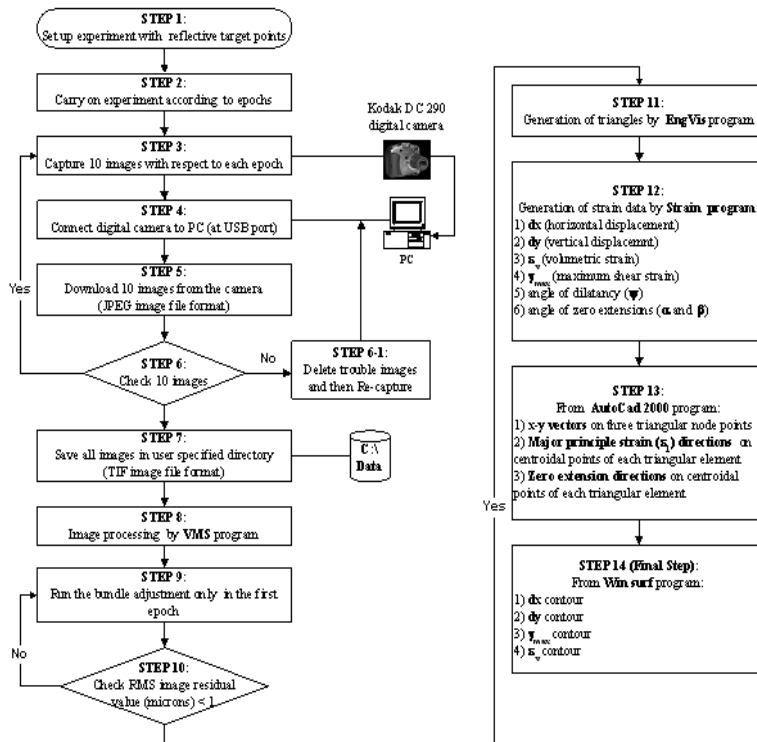


그림 6. 전형적인 사진계측 프로세스(process)

4. 수치해석

알루미늄 봉에 대한 물성치를 규명하기 위해 일반적으로 모래의 전단(angle of shearing resistance) 및 팽창(dilation angle) 특성을 얻기 위해 이용되는 카사그란드 쉬어 박스(Casagrande shear box)를 전면이 오픈(open)되고 박스 사이즈가 알루미늄 봉 재료에 적합하게 개조하였다.(Lee, 2004) 표 1은 개조된 카사그란드 쉬어 박스를 통해 얻어진 재료의 물성치를 정리한 것이다.

표 1. 직접전단시험을 통해 얻어진 알루미늄 봉의 물성치

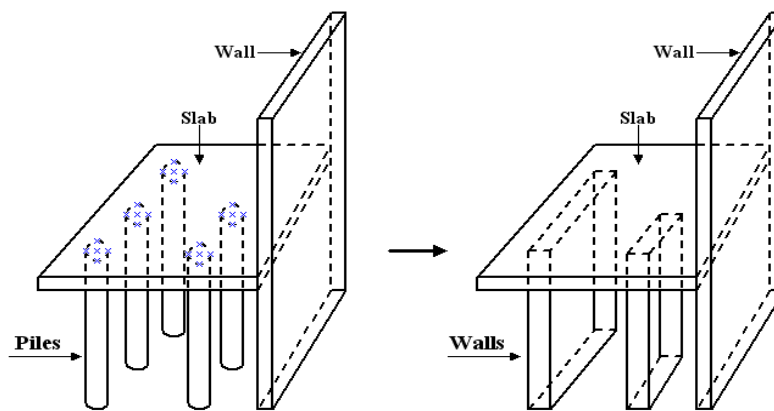
$\phi'(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	$\delta_w(^{\circ})$	$\gamma_{rod}(kN/m^3)$
22 ~ 31	6 ~ 15	12 ~ 14	19.6 ~ 20.1

파일의 하중재하시험을 통해 얻어진 하중-침하(P-S) 곡선을 이에 대한 매개변수 수치해석에서 얻어진 P-S 결과와 비교하여 최적의 물성치를 다음의 표 2와 같이 얻게 되었다. 여기서 Young's modulus(m_E)와 점착력(m_c)은 심도에 따라 선형적으로 증가되는 Gibson's soil에 기반을 두고 있으며 K_0 값은 0.66을 적용시켰다. 표 2에 정리된 물성치는 직접전단시험에서 얻어진 물성치와도 전반적으로 유사한 것으로 나타났다.

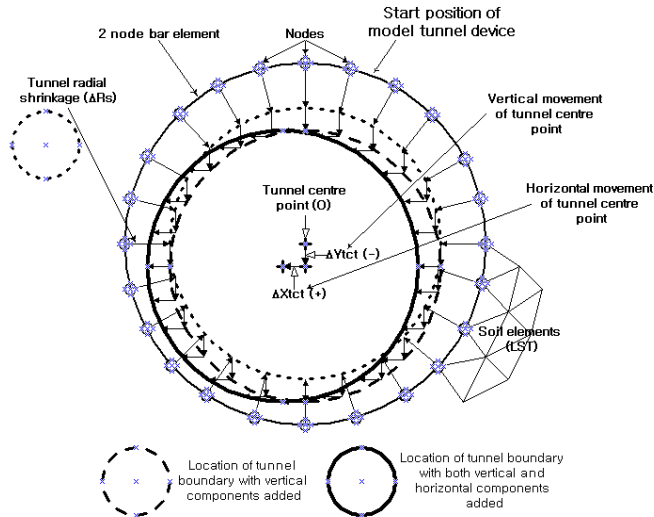
표 2. 파일 매개변수 수치해석을 통해 얻어진 최적의 물성치

$c'(kN/m^2)$	ν	$\phi'(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	$E_0(kN/m^2)$	$m_E(kN/m^2/m)$	$m_c(kN/m^2/m)$	$\gamma_{bulk}(kN/m^3)$	$\delta_w(^{\circ})$
0.1	0.35	23	15	1600	10000	0	24	5(side) 23(tip)

실제 3차원 파일은 다음 그림 7(a)와 같이 단순화시킬 수 있다.(Potts and Zdrakovic, 2001) 하지만 터널의 경우 매우 복잡한 절차를 가지고 있다. 이는 모형실험에서 볼 수 있듯이 터널이 어느 한 점에서 고정되어 있지 않고 인접한 파일에 재하되는 하중, 즉 파일 워킹로드(P_w) 및 굴착으로 인해 자유롭게 움직이기 때문이다. 이러한 현상을 수치해석상에 시뮬레이션(simulation) 한다는 것은 매우 복잡한 일이다. 먼저 사진계측으로 얻어진 터널장비 주변의 타겟 포인트를 이용해 터널의 중심점을 계산하여야 한다. 이러한 중심점의 변화를 수치해석상에 반영하기 위해서는 bar element의 2개 노드점들(node points)에 대해서 초기의 중심점에서 시작해 터널 굴착동안 x-y 방향으로 변화되는 중심점 값을 적용시켜야 한다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 터널장비의 지름이 축소되는 과정(ΔR_s)과 터널 중심점(O)이 아래로 움직이는 과정(ΔY_{tct})을 거치며 마지막으로 좌측으로 움직이는 과정(ΔX_{tct})을 거친다.



(a) 2차원으로 단순화된 파일 기초



(b) 플로팅(floating)하는 터널의 수치 시뮬레이션(numerical simulation)
 그림 7. 수치해석에 사용된 파일기초 및 터널

그림 8은 B+1에 대한 유한요소망을 나타내고 있다.

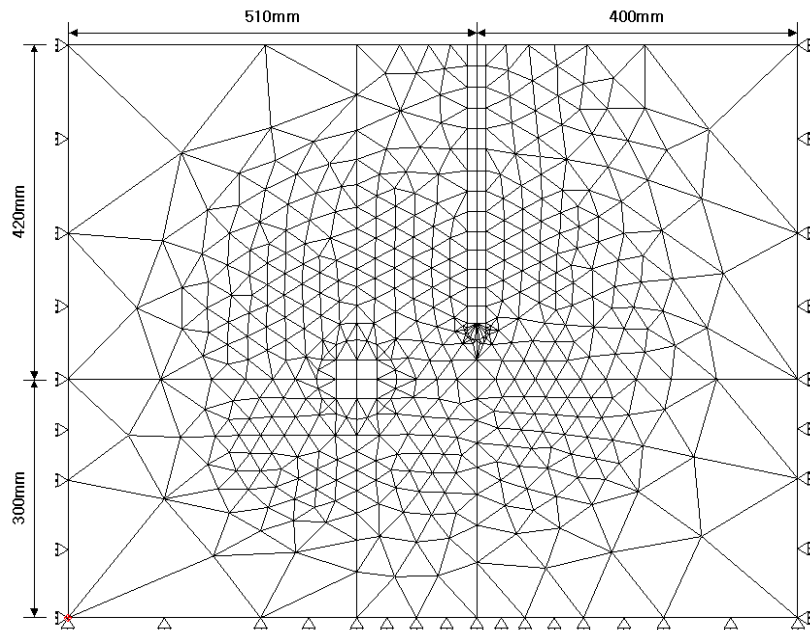
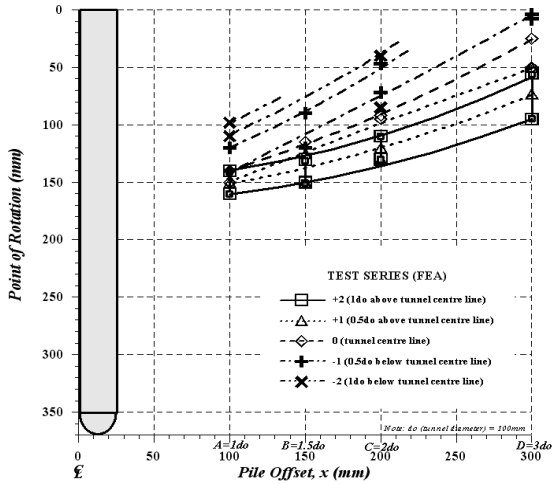


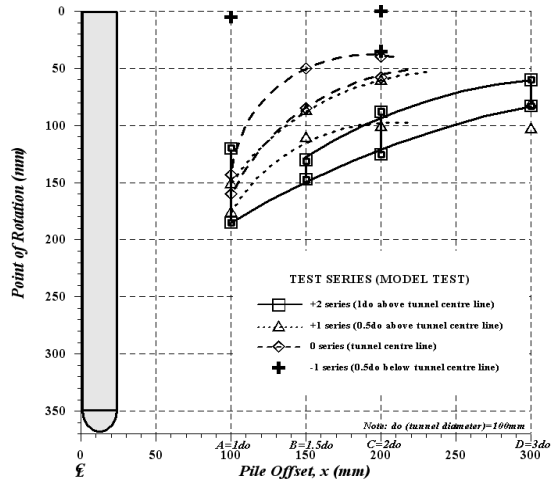
그림 8. B+1 유한요소망(566 nodes and 1062 elements)

5. 결 과

모형실험에서 보는 바와 같이 모형파일의 선단부(또는 팁)는 지반에 고정되어 있지 않고 터널 굴착시 지반내에서 자유롭게 움직이는 것으로 되어 있다. 따라서 터널 굴착으로 인한 지반손실(V_L)이 증가함에 따른 파일의 회전점(rotation point)은 그림 9와 같다. 모형실험에서 얻어진 회전점은 파일 팁의 위치가 터널에서 멀어짐에 따라 지표를 향해 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있으며 전체적인 패턴(pattern)은 수치해석에서 얻은 결과와는 달리 부드러운 커버의 형태를 나타내고 있다. 비록 회전점이 분포되는 패턴은 다르지만 정량적으로 유사한 위치를 나타내고 있다.



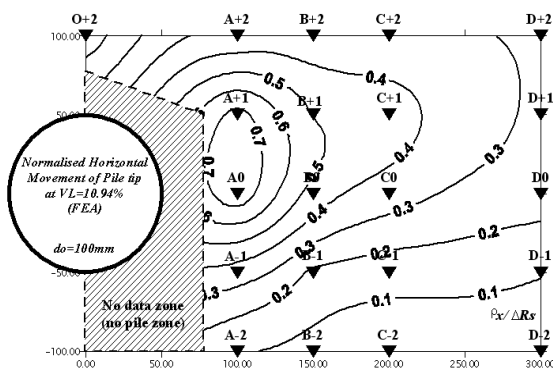
(a) 수치해석 결과



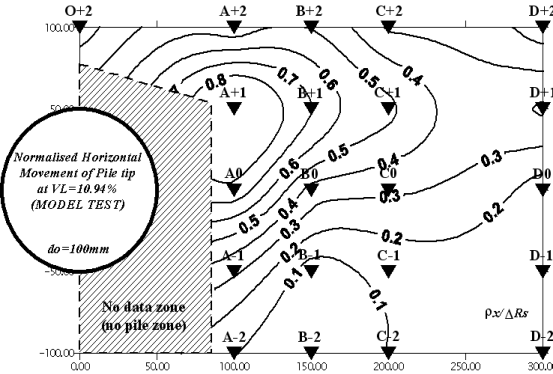
(b) 실내모형실험 결과

그림 9. 파일 회전점(rotation point) 위치의 비교

그림 10은 파일 팁(tip)의 수평방향의 움직임을 지반손실 11% 때의 터널 지름축소 값 $\Delta R_s=2.83\text{mm}$ 에 대해 일반화하였다. 수치해석은 모형실험 결과와 유사하게 나타났다. 특히 파일 팁이 터널과 가깝게 인접한 지역에서는 그 분포양상이 매우 유사하게 나타났다.



(a) 수치해석 결과



(b) 실내모형실험 결과

그림 10. 파일 팁(tip)의 수평변형(normalised horizontal movement)의 비교

그림 11은 파일 팁(tip)의 수직방향의 움직임을 지반손실 11% 때의 터널 지름축소 값 $\Delta R_s=2.83\text{mm}$ 에 대해 일반화하였다. 수치해석은 모형실험 결과와 유사하게 나타났다. 특히 파일 팁의 수평방향 움직임처럼 파일 팁이 터널과 가깝게 인접한 지역에서는 그 분포양상이 유사하게 나타났다. 수치해석 결과 일반화된 수직변형 값이 1미만인 지역에서는 그 분포가 상당히 일관성 있게 나타나나 실내모형실험 결과에서는 불규칙적인 분포를 나타낸다. 이는 실제 모형실험에 있어서 경미한 오류가 포함되어 있음을 암시하며 또한 한편으로는 실험의 어려움을 나타내기도 한다.

그림 11을 기반으로 터널 굴착으로 인한 파일 침하의 영향권을 다음 그림 12에서 보여주는 바와 같이 4개의 존(zone)으로 제시하였다. 아울러 실제 현장에서 발생하는 경미한 지반손실 즉 $V_L=2\%$ 일때 발생하는 파일의 침하량을 계산하였다. 제안된 영향권은 기존의 영향권에 비해 깊고 넓은 것으로 나타났다. 만약 터널이 영향권 II 안에서 굴착될 경우 파일이 크게 침하될 것으로 예상되어지며 이러한 경우 반드시 수치해석을 통해 그 값을 미리 검증하는 작업이 필요하다고 판단된다.

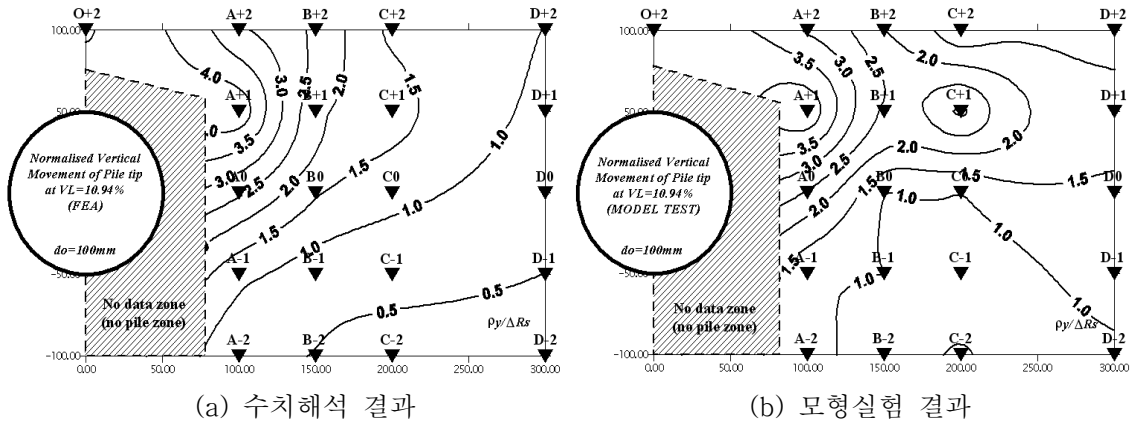


그림 11. 파일 팁(tip)의 수직변형(normalised vertical movement)의 비교

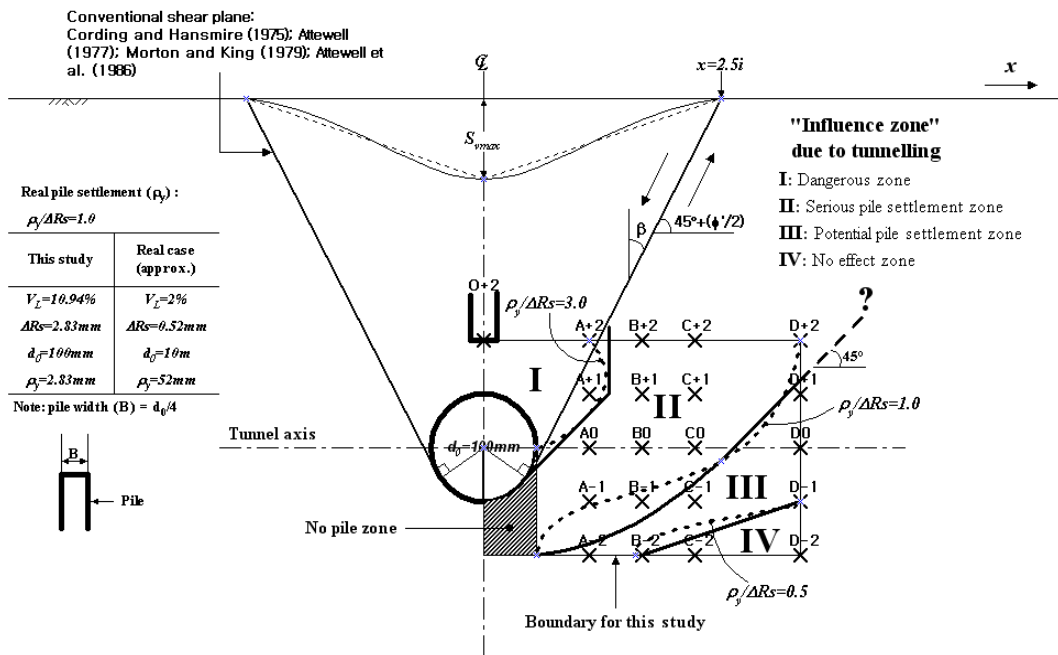


그림 12. 파일 팁(tip)의 수직변형(normalised vertical movement)을 기반으로 제안한 영향권

6. 결론

터널 굴착으로 인한 인접 파일 구조물의 거동에 대한 해석적 접근은 매우 복잡한 바운드리 (boundary) 문제라고 할 수 있다. 하지만 실내모형실험을 통해 터널 굴착으로 인해 영향을 받는 파일의 거동을 사진계측을 사용해 규명할 수 있으며 아울러 유한요소법을 이용한 수치해석으로 파일의 변형 및 그 역학적 거동을 잘 검증할 수 있다. 신뢰할 수 있는 수치해석 결과를 얻기 위해서는 재료의 물성치를 매개변수해석 수행 및 직접전단실험 등 실내실험을 통해 규명하고 이에 적합한 탄소성모델을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 사질토의 팽창특성을 제어할 수 있는 Non-associated flow 규칙을 Mohr-Coulomb 모델에 적용시켰다.

본 연구에서는 터널 굴착으로 인한 파일 침하 영향권을 제안하였으며 이러한 영향권은 주로 파일 선단부의 위치, 지반손실 정도, 흙의 강도 및 파일의 규격 등에 크게 의존하는 것으로 나타나 기존의 영향권에 비해서는 깊고 넓은 특징이 있다.

참고문헌

1. Attewell, P. B. (1977). Ground movements caused by tunnelling in soil. *Proceedings of International Conference on Large Movements and Structures*, (ed. J. D. Geddes), pp. 812-948. London.
2. Attewell, P. B., Yeates, J. & Selby, A. R. (1986). *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. Glasgow: Blackie.
3. Cording, E. J. & Hansmire, W. H. (1975). Displacements around soft ground tunnels. *5th Pan American Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tunnels in Soil, General Report, Session IV, Buenos Aires.
4. Jacobsz, S. W., Standing, J. R., Mair, R. J., Soga, K., Hagiwara, T. & Sugiyama, T. (2001). Tunnelling effect on driven piles. *Proceedings of International Conference on Response of buildings to excavation-induced ground movements*, pp. 1-15. Imperial College, London: CIRIA.
5. Lee, Y. J. (2004). *Tunnelling adjacent to a row of loaded piles*. PhD Thesis, University College London, University of London.
6. Morton, J. D. & King, K. H. (1979). Effects of tunnelling on the bearing capacity and settlement of piled foundations. In *Tunnelling '79* (ed. M. J. Jones), pp. 57-68. London: IMM.
7. Potts, D. M. & Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Application*. London: Thomas Telford.
8. SAGE-CRISP Technical manual, Version 4. <http://www.mycrisp.com/demo/TECHMAN.pdf>: The CRISP Consortium Ltd.; 2001.
9. Schroeder, F. C., Potts, D. M. & Addenbrooke, T. I. (2004). The influence of pile group loading on existing tunnels. *Géotechnique* 54, No. 6, 351-362.
10. Yamamoto, K. & Kusuda, K. (2001). Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations. *Geotextiles and Geomembranes* 19, 127-162.