

2차원 실내모형실험과 수치해석을 이용한 사질토 지반의 얇은 터널에 대한 지중변형에 대한 규명

Investigation of Subsurface Deformations for the Shallow Tunnel In A Granular Mass Using Two-Dimensional Laboratory Model Test and Numerical Analysis

이용주¹⁾, Yong-Joo Lee

¹⁾ 한국철도기술연구원, 궤도노반연구팀, 선임연구원, Senior Researcher, Track Geotechnology Research Team, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : In urban areas, tunnelling induced ground deformations, particularly ground settlements should be considered in order to minimize the damage of adjacent structures. Therefore, an appropriate monitoring system for the tunnel construction should be setup at the planning or design stage. A number of studies on ground settlements due to tunnelling in soft ground have been carried out so far. However, most studies have focused on clay soil rather than sand soil. In particular, a few studies on behaviour of subsurface deformations in granular material have been reported.

In this study, two-dimensional laboratory model test with aluminium rods regarded as continuum granular material and close range photogrammetric technique, and numerical analysis were carried out in order to identify the behaviour of subsurface deformations due to shallow tunnelling. Direction and magnitude of displacement vectors from the model test was identical to the numerical analysis. In particular, the vector direction was appeared to be toward a point below the tunnel invert level. A narrow "chimney or tulip like" pattern of vertical displacement was confirmed by both the model test and numerical analysis. This is consistent with the field data. In addition to the qualitative comparison, the quantitative comparison of subsurface settlements according to 2D volume loss showed good agreement between the model test and numerical analysis. Therefore, close range photogrammetric technique applied in the model test may be used to validate the result from the continuum numerical analysis.

Key words : Shallow tunnel, Continuum granular material, Subsurface deformation, Aluminium rods, Close range photogrammetric technique, Continuum numerical analysis

1. 서 론

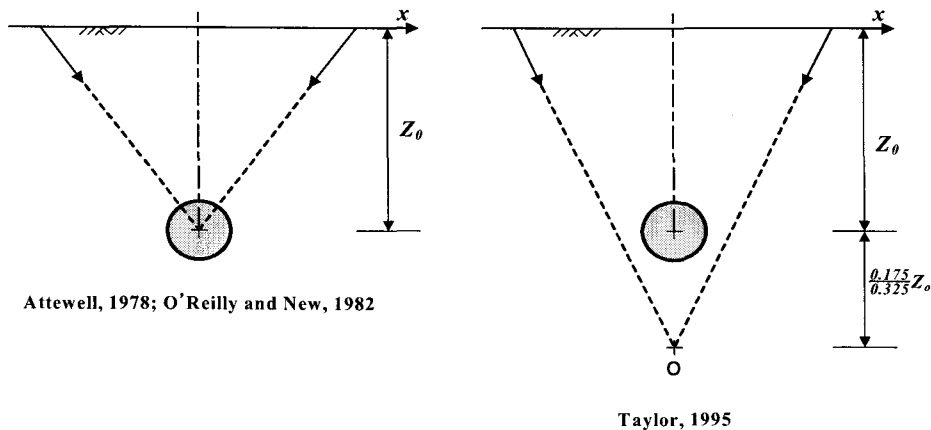
도시지 터널굴착으로 인한 지반변형, 특히 지표면 침하는 인접한 구조물의 손상을 최소화하기 위해서 반드시 고려해야 되는 사안이며 이를 위해 계획 및 설계단계에서 터널굴착에 따른 적절한 계측시스템을 수립해야 된다. 현재까지 터널굴착으로 인한 연약지반의 지표침하와 관련하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 경우는 사질토 지반 보다는 점성토 지반에 집중되었으며, 특히 사질토 지반에서의 지중변형 거동에 대한 연구는 미미한 편이다.

본 연구에서는 얇은 터널에 대한 지중침하 특성을 규명하기 위해서 2차원 연속체 사질토 기반을 모사하는 알루미늄 봉 재료와 근거리 사진계측기법을 이용한 2차원 실내모형실험과 더불어 2차원 연속체에 근간을 두는 수치해석을 수행하였다. 모형실험 및 수치해석 결과 나타난 변위 벡터의 방향과 크기는 서로 잘 일치하였으며, 특히 벡터의 방향은 터널의 축을 향하지 않고 인버트 아래의 한 점을 향하는 것으로 나타났다. 수직변위의 형태는 침하의 폭이 점성토에 비해 상대적으로 좁은 “굴뚝 또는 튜울립” 모양으로 나타났다. 이는 실제 현장계측에서 나타난 결과와도 유사한 결과라고 할 수 있다. 이러한 정성적인 비교와 더불어 2차원 지반손실에 따른 지중에서의 최대 침하량을 비교한 결과, 모형실험은 수치해석 결과와 정량적으로도 매우 유사하게 나타났다. 따라서 모형실험에 이용하는 근거리 사진계측기법은 연속체 수치해석의 결과를 평가하는데 유용하게 적용될 수 있다.

2. 연약지반에서 터널굴착으로 인한 침하 특성

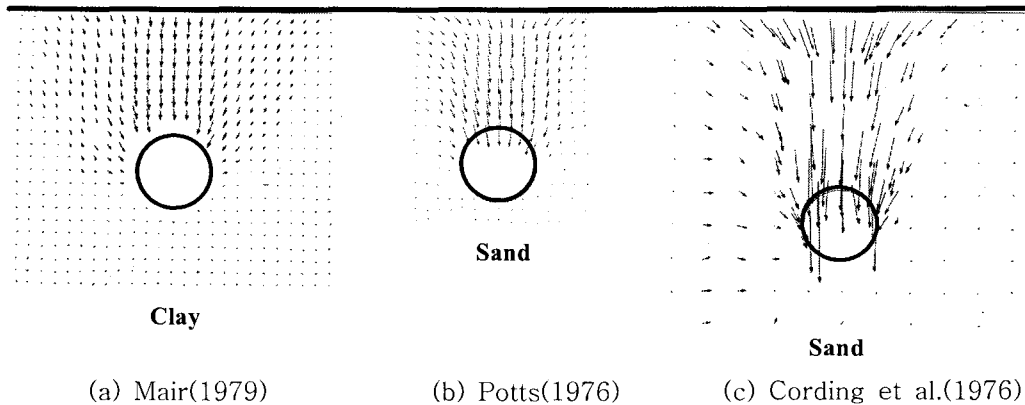
일반적으로 점성토 지반에서 터널굴착으로 인한 지표면 침하 폭은 터널 깊이의 약 3배 정도인 것으로 알려져 있다(Burland et al., 2001). 그러나 사질토 지반의 경우 이러한 정량적인 침하 폭이 명확히 알려져 있지는 않으나, 점성토 지반에 비해 통상적으로 작은 침하 폭으로 나타남을 여러 현장 및 실험 자료를 통해 인지할 수가 있다. 이러한 차이는 지반의 특성과도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 점성토 지반에서는 터널 굴착시 체적의 변화가 없는 것으로 간주하지만, 사질토 지반의 경우 팽창을 동반함으로 체적이 변화된다. 따라서 지표면에서의 체적 손실은 터널 굴착으로 인한 전 체적 손실 보다 작게 나타난다. 현재까지 점성토 및 사질토에 대한 지표면 침하에 대한 연구는 Peck (1969) 이래 많이 수행되어 왔으나, 특히 사질토 지반의 지중에서의 변형 특성과 관련된 실내모형실험은 미미한 편이라 할 수 있다(Potts, 1976; Cording et al., 1976; Atkinson and Potts, 1977).

그림 1에서 보는 바와 같이 점성토 지반에서의 터널굴착으로 인한 변위벡터의 방향은 초기에는 그림 1(a)의 경우처럼 터널 중심축을 향하는 것으로 Attewell(1978)과 O'Reilly and New(1982)가 제안하였지만, Taylor(1995)는 그림 1(b)로 수정하여 제안하였다. 이는 Dean and Bassett(1995)의 Heathrow Express trial 터널 현장의 측정 결과와도 잘 일치되는 현상이라 할 수 있다.



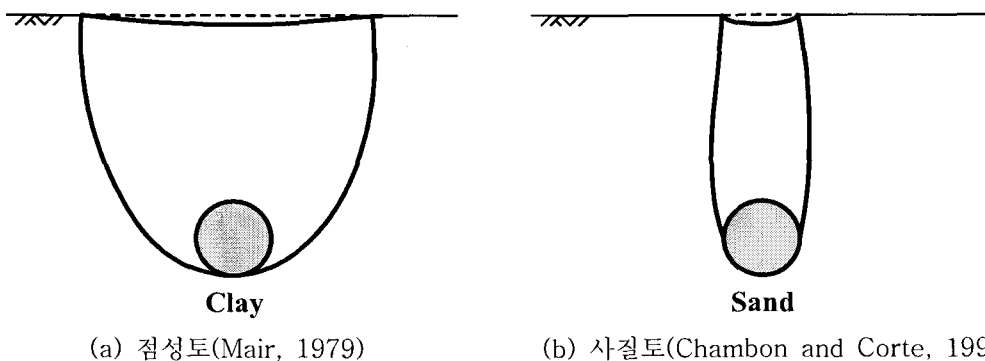
(a) 벡터방향 터널 중심축을 향함 (b) 벡터방향 터널 인버트 아래 O점을 향함
그림 1. 터널굴착으로 인한 점성토 지반에서의 변위 벡터의 방향

터널 굴착으로 인한 사질토 지반에서의 변위 벡터의 양상은 그림 2(b)와 2(c)에서 보는 것처럼 지표면에서 비교적 큰 침하와 더불어 침하 폭이 좁은 형태를 보여 준다. 이는 그림 2(a), 즉 점성토 지반의 거동과 대조적인 형태임을 알 수 있다. 여기서 특히 기억해야 될 점은 지하수위가 실험에 고려되지 않았다는 사실이다.



(a) Mair(1979) (b) Potts(1976) (c) Cording et al.(1976)
 그림 2. 점성토 및 사질토 지반에서 모형터널 주변의 변위 벡터(축척 고려 안함)

Centrifuge 모형실험 결과, 사질토 지반에서의 터널 굴착으로 인한 지반 파괴메카니즘은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 “굴뚝 또는 튜올립” 모양을 나타냈다. 이는 위에서 언급한 변위 벡터의 양상과도 잘 일치하는 현상이다. 이와는 대조적으로 점성토 지반에서의 파괴메카니즘은 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 터널 인버터로부터 시작하여 터널의 폭에 비해 파괴 폭이 상대적으로 넓게 나타났다. 이러한 파괴메카니즘 역시 위에서 언급한 변위 벡터의 양상과도 잘 일치되는 현상이다.



(a) 점성토(Mair, 1979) (b) 사질토(Chambon and Corte, 1994)
 그림 3. Centrifuge 모형실험을 통해 관측된 파괴메카니즘

3. 2차원 실내모형실험

2차원 실내모형실험을 모사하기 위해 사질토 지반으로 이상화 된 알루미늄 붕 재료를 사용하였으며, 모형터널장비를 이용한 얇은 터널굴착에 따른 지중에서의 변위를 측정하기 위해서 근거리 사진계측기법을 사용하였다.

3.1 실험장비

그림 4와 같은 2차원 얇은 터널에 대한 모형실험을 실시하기 위해서 각각의 지름이 다른 알루미늄 붕 재료를 사용하였으며, 이 중 지름이 2mm와 3mm인 알루미늄 붕을 모형터널 주변에 집중적으로 배치하였다. 아울러 상대적으로 지름이 큰 붕 재료는 터널과 많이 이격된 위치인 모형토조 주변에 주로 배치하였다. 여기서, 특이할 사항은 Green field 조건을 모사하기 위해 지표면에서의 하중은 적용시키지 않았다.

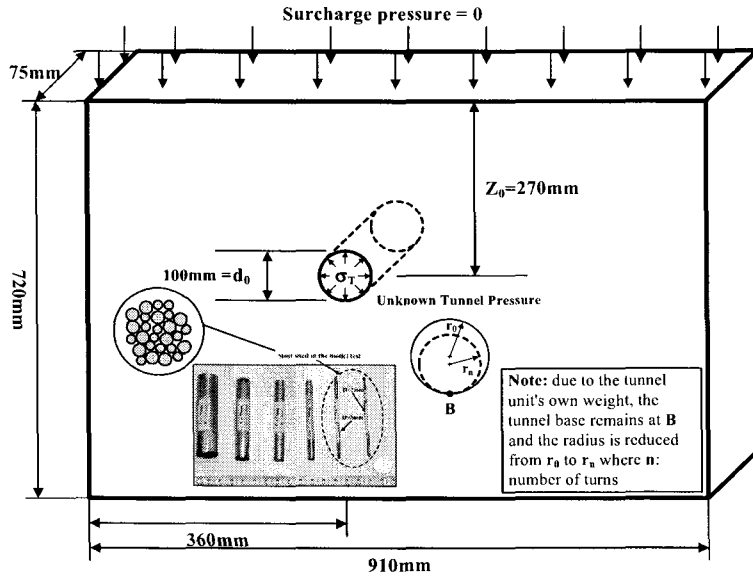


그림 4. 알루미늄 봉 재료를 이용한 얇은 터널에 대한 2차원 실내모형실험

그림 4에서 터널굴착에 대한 효과를 모사하기 위해 모형터널 장비를 고안하였다. 이러한 모형터널은 그림 5에서 보는 바와 같이 지름축소식으로 앞뒤의 노브를 조절하여 그 지름을 점진적으로 줄여 가면서 터널굴착을 모사하는 방식이다. 이러한 터널굴착의 정도는 모형터널에 대한 검증시험으로부터 얻어진 2차원 지반손실(V_L)로 표현된다(Lee, 2004). 모형터널을 손으로 작동시키기 때문에 모터로 작동시키는 자동시스템에 비해 터널의 지름축소 조절에 대한 정밀도는 떨어지지만 비용이 저렴하고 빠른 시간 내에 터널의 파괴를 유도하는데 유리한 장점이 있다.

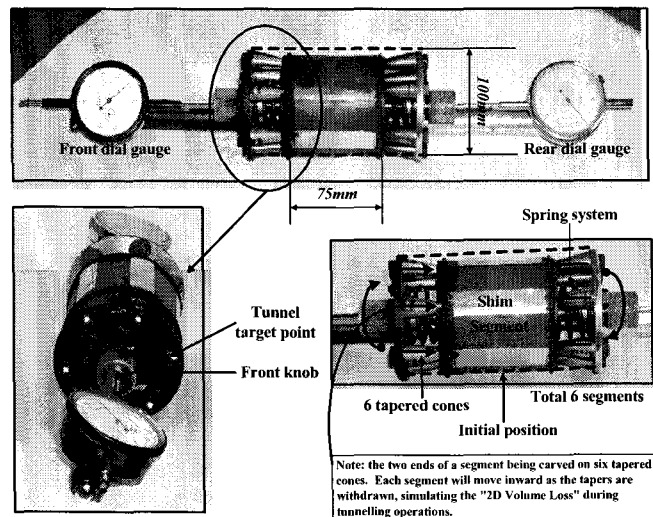


그림 5. 지름축소식 2차원 모형터널장비

3.2 이미지 프로세싱을 통한 축점의 삼각요소망 생성

근거리 사진계측기법을 이용하여 372 축점에 대한 변위를 측정하였으며, 또한 이미지 프로세싱을 통해 그림 6과 같은 삼각요소망을 생성하였다. 사진계측 및 이미지 프로세싱에 대한 자세한 내용은 Lee and Bassett(2006)에 잘 설명되어 있다. 모형실험에서 얻은 삼각요소망은 연속체에 근간을 두는 유한

요소 수치해석의 유한요소망과 유사하며 본 연구의 궁극적인 목적인 결과 비교에 유용하게 이용된다.

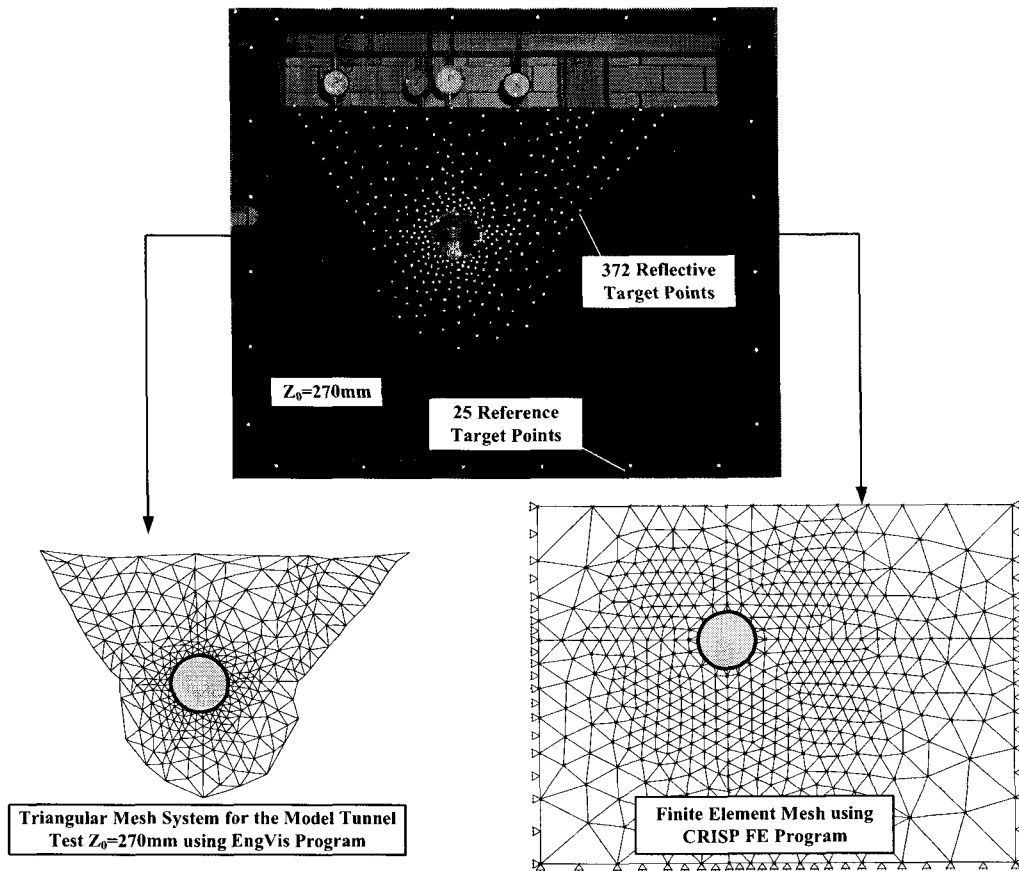


그림 6. 모형실험에 대한 이미지 프로세싱을 통한 삼각망과 수치해석을 위한 유한요소망

3.3 실험절차

모형실험을 수행하기 위한 절차는 먼저 알루미늄 봉과 모형터널을 준비하여 그림 6에서 보는 바와 같이 설치한다. 설치가 끝나면 327개의 측점이 부착된 알루미늄 봉을 모형터널 주변을 중심으로 배치해 나간다. 설치가 완료되면 사진계측을 위해 초기상태에 대한 10개의 이미지를 기록한다. 다음은 모형터널의 앞뒤의 노브를 회전시켜 터널 지름을 축소시킨다. 이 때 다이얼게이지 1회전에 해당하는 2차원 지반손실은 1.96%, 3회전은 5.83%, 6회전은 10.94%, 9회전은 15.21%이다. 각각의 지반손실에 따른 사진계측을 실시한다. 여기서 특이할 사항은 모형터널의 지름이 축소되는 동안 터널 자체는 물리적으로 일정한 지점에 고정되지 않는다는 사실이다. 즉 터널의 중심점이 변화하는데 이렇게 변화되는 중심점을 터널 주변의 측점을 사진계측을 통해 측정하고 규명해 보면, 그림 7과 같이 굴착이 진행되는 동안 수평방향에 대해서는 변화가 없고 단지 수직방향인 아래로 움직임을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 터널 깊이가 다른 모형실험($Z_0=420\text{mm}$, $Z_0=470\text{mm}$)에서도 확인할 수 있었다. 그러나 만약 이러한 모형터널에 인접하여 약 80%의 하중을 말뚝 선단에서 받는 선단지지말뚝이 있는 경우, 터널의 물리적 중심점은 수직방향과 더불어 수평방향으로 움직이게 되는 사실을 Lee(2004)의 파일-지반-터널굴착에 대한 모형실험 결과를 통해 확인할 수 있다. 위에서 언급한 터널의 중심점 변화는 수치해석에 있어 터널굴착을 모사하는데 매우 중요한 피드백 입력 자료로 활용된다.

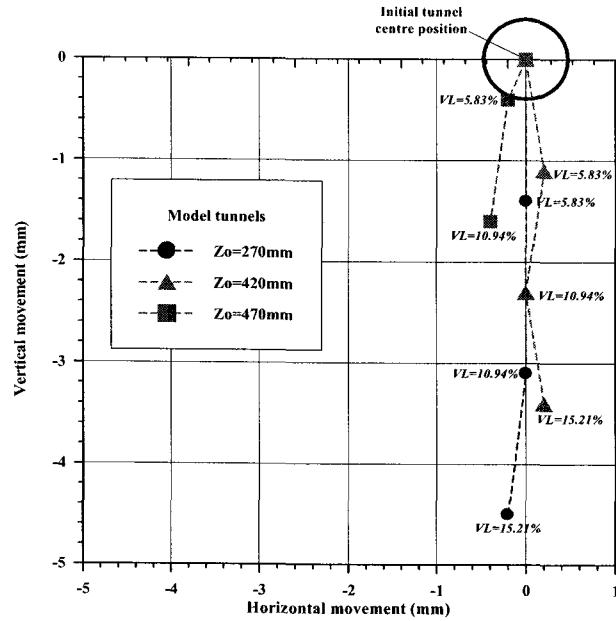


그림 7. 사진계측을 통한 모형터널의 중심점 변화 측정 결과

4 수치해석

4.1 2차원 터널굴착의 모사

모형터널의 중심점 변화를 2차원 수치해석에 모사하기 위해서는 2차원 지반손실에 해당되는 수직 및 수평변위의 값을 구해야 된다. 그림 7에서의 보는 바와 같이 얇은 터널인 $Z_0=270\text{mm}$ 경우, 수평변위가 거의 변화가 없으므로 수직변위(ΔY_{tct})와 지름이 ΔR_s 로 축소되는 사항만 그림 8과 같이 강성이 지반에 비해 매우 큰 두 개의 절점으로만 구성되어 있는 Bar 요소(2 noded bar element)에 적용하면 된다.

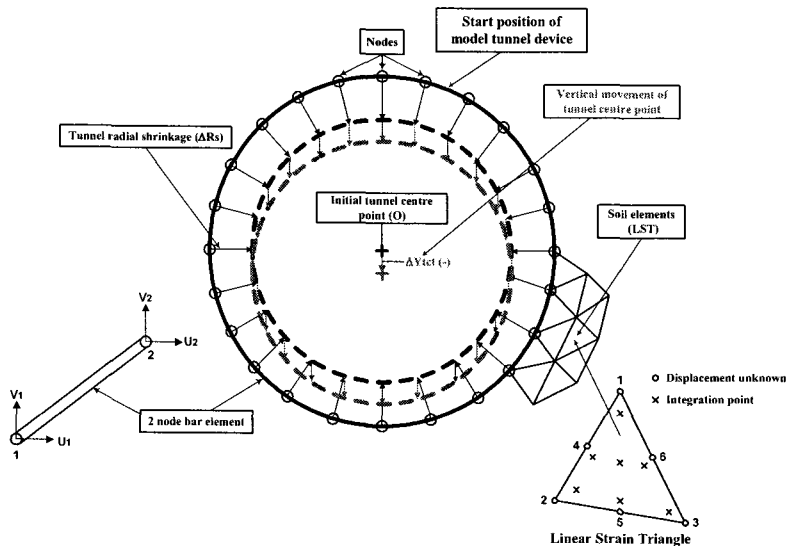


그림 8. 지름축소식 모형터널에 의한 터널굴착을 수치해석에 모사하는 방법

4.2 해석조건

해석을 위해 사용된 유한요소프로그램은 Britto and Gunn(1987)에 의해 개발된 CRISP(ver 4.3)이며, 프로그램의 특성에 대해서는 Woods and Rahim(2001)에 의해 설명되어 있다. 지반구성모델은 깊이에 따라 점착력(c)과 탄성계수(E) 값이 변화하는 Gibson 지반에 기반을 둔 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 지반 및 Bar 요소에 대한 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 수치해석에 적용된 재료의 물성치

재료	c (kN/m ²)	v	Φ' (°)	ψ (°)	E ₀ (kN/m ²)	m _E (kN/m ² /m)	m _c (kN/m ² /m)	γ _{bulk} (kN/m ³)	A _{bar} (m ²)
지반	0.1	0.35	23	15	1,600	10,000	0	24	-
Bar	-	0.2	-	-	1.55×10 ⁷	-	-	-	0.003

(주) 지표면 높이(y₀): 0.72m; m_E와 m_c는 깊이에 따른 증가비율; K₀=0.66

해석을 위한 유한요소망은 위의 그림 6과 같으며, 총 543개의 절점과 1,058개의 유한요소가 사용되었다. 여기서 터널의 중심이 대칭이 아니고 왼편에 치우쳐 위치하는 이유는 나중에 수행될 파일-지반-터널굴착의 모형실험과 관련해 파일 선단부가 터널 중심축을 기준으로 주로 오른편에 위치하기 때문이다. 해석절차는 다음의 표 2와 같다.

표 2. 해석 절차

순서	해석 및 사진계측 단계	V _L (%)	Time-step	증가분 수(누적)
1	모형터널 삽입: 사진계측_0	0	1	100(100)
2	지름축소 1단계: 사진계측_1	5.83	1	50(150)
3	지름축소 2단계: 사진계측_2	10.94	1	50(200)
4	지름축소 3단계: 사진계측_3	15.21	1	50(250)

5 모형실험 및 수치해석 결과 비교

사진계측을 통해 얻어진 모형실험에 대한 변위 벡터와 수치해석 결과를 2차원 지반손실 10.94%에서 비교하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 확인하는 바와 같이 비록 실험 및 수치해석에서의 2차원 지반손실이 실제 현장에서 실측되는 값(1~2%) 보다는 훨씬 큰 값이지만, 벡터의 방향은 터널 축을 향하는 것이 아니라 인버트 아래 어느 한 점을 향하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구결과에서 얻은 알은 터널 굴착에 의한 변위 벡터의 방향은 Taylor(1995)와 Dean and Bassett(1995)이 제안한 내용과 잘 부합된다고 할 수 있다.

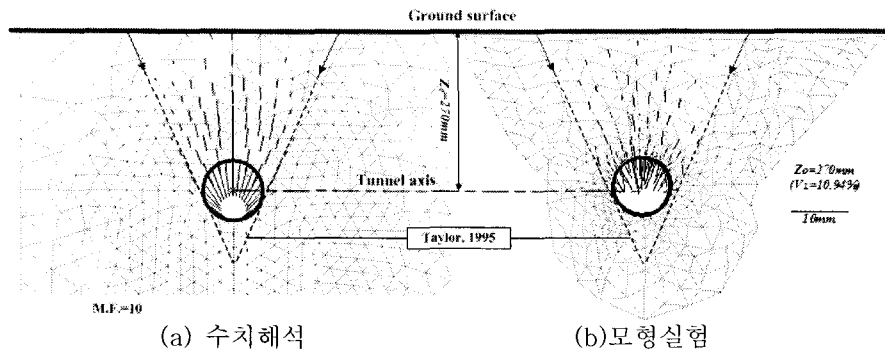


그림 9. 변위 벡터의 비교(2차원 지반손실=10.94%)

위에서 비교한 변위 벡터와 더불어 수직변위(d_y)를 비교하면 그림 10과 같다. 수치해석 결과는 놀랍게도 모형실험 결과와 매우 유사하게 나타났다. 변위의 분포 및 양상에 있어서는 앞에서 언급한 기존의 연구결과와 같이 침하 폭이 점성토에 비해 상대적으로 좁고 “굴뚝 또는 튜울립” 형태와 같은 파괴형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

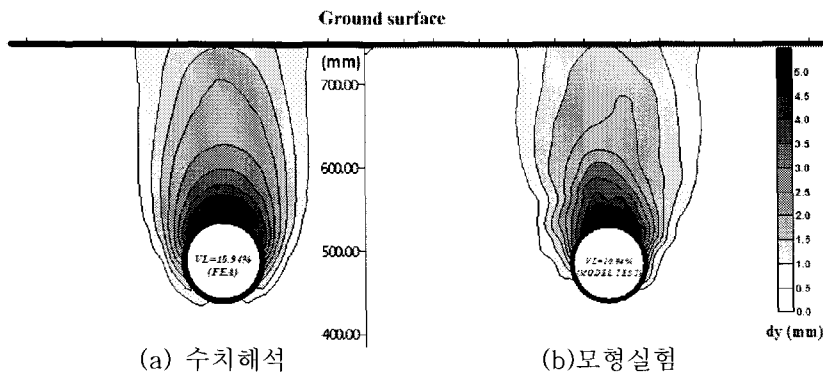


그림 10. 수직변위의 비교(2차원 지반손실=10.94%)

위에서 비교한 그림 9와 그림 10은 정량적인 비교이기 보다는 정성적인 비교로서 변위에 대한 방향 및 경향에 대해서 주로 언급되어 진다. 따라서 그림 11과 같이 2차원 지반손실(V_L)에 따른 지중에서의 최대침하량(S_{vmax})을 정량적으로 비교하였다.

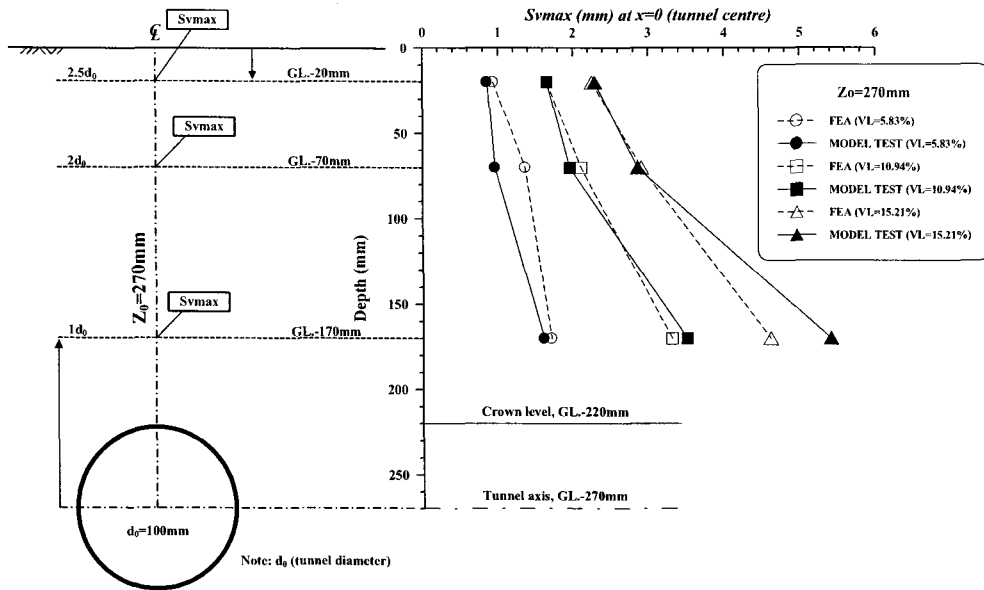


그림 11. 지반손실에 따른 지중에서의 최대침하량 비교

그림 11에서 보는 바와 같이 GL.-20mm에서 수치해석 결과는 모형실험과 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 심도가 깊어질수록 모형실험 결과가 약간 큰 값으로 나타났다. 전체적인 경향은 수치해석 및 모형실험 모두 심도가 증가할수록 점점 커지는 형태로 나타났다.

6 결론

본 연구에서는 얇은 터널에 대한 지중침하 특성을 규명하기 위해서 2차원 연속체 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉 재료와 근거리 사진계측기법을 이용한 2차원 실내모형실험과 더불어 2차원 연속체에 근간을 두는 수치해석을 수행하였다. 모형실험 및 수치해석 결과 나타난 변위 벡터의 방향과 크기는 서로 잘 일치하였으며, 특히 벡터의 방향은 터널의 축을 향하지 않고 인버터 아래의 한 점을 향하는 것으로 나타났다. 수직변위의 형태는 침하의 폭이 점성토에 비해 상대적으로 좁은 “굴뚝 또는 튜올립” 모양으로 나타났다. 이는 실제 현장계측에서 나타난 결과와도 유사한 결과라고 할 수 있다. 이러한 정성적인 비교와 더불어 2차원 지반손실에 따른 지중에서의 최대 침하량을 비교한 결과, 모형실험은 수치해석 결과와 정량적으로도 매우 유사하게 나타났다. 따라서 모형실험에 이용하는 근거리 사진계측기법은 연속체 수치해석의 결과를 평가하는데 유용하게 적용될 수 있다. 본 연구에서 특히 할 사항은 지하수위를 고려하지 않은 건조된 상태라고 가정하고 실험을 수행하였다. 이는 도심지에서 터널을 제외한 제반 구조물 축조를 위한 가시설 굴착을 통해 이미 지하수위가 터널 인버트 아래로 떨어져 터널굴착으로 영향을 받지 않는다는 시나리오에서 실험 및 수치해석을 실시하였다.

참고 문헌

1. Atkinson, J. H. and Potts, D. M.(1977), "Subsidence above shallow tunnels in soft ground", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 307-325.
2. Attewell, P. B.(1977), "Ground movements caused by tunnelling in soil", *Proc. of Int. Conf. on Large Movements and Structures*, Geddes, J. D.(ed), London, pp. 812-948.

3. Britto, A. and Gunn, M.(1987), *Critical Soil Mechanics via Finite Elements*, Ellis Horwood, Chichester.
4. Burland, J. B., Standing, J. R. and Jardine, F. M.(2001), "Building responses to tunnelling - Case studies from construction of the Jubilee Line Extension", *CIRIA 2001*, CIRIA Special Publication 200, Thomas Telford, London, pp. 23-43.
5. Chambon, J. F. and Corte, J. F.(1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel safe", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 1150-1163.
6. Cording, E. J., et al.(1976), "Displacements around tunnels in soil", Report to U.S. Department of Transportation prepared at the University of Illinois at Urbana-Champaign, DOT-TST-76T-22.
7. Dean, P. A. and Bassett, R. H.(1995), "The Heathrow Express trial tunnel", *Proc. of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 113, July, pp. 144-156.
8. Lee, Yong-Joo(2004), *Tunnelling adjacent to a row of loaded piles*, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University College London.
9. Lee, Y. J. and Bassett, R. H.(2006), "Application of a photogrammetric technique to a model tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, Issue No. 01, pp. 79-95.
10. Mair, R. J.(1979), *Centrifuge modelling of tunnel construction in soft clay*, PhD Thesis, University of Cambridge.
11. O'Reilly, M. P. and New, B. M.(1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", *Tunnelling '82*, Jones, M. J.(ed), The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 173-181.
12. Peck, R. B.(1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", *Proc. of 7th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, State of the Art Volume, pp. 225-290.
13. Potts, D. M.(1976), *Behaviour of lined and unlined tunnels in sand*, PhD Thesis, University of Cambridge.
14. Taylor, R. M.(1995), "Tunnelling in soft ground in the UK", *Underground Construction in Soft Ground*, Fujita, K. and Kusakabe, O.(eds), Balkema, pp. 123-126.
15. Woods, R. and Rahim, A.(2001), *SAGE-CRISP Technical manual*, Version 4, <http://www.mycrisp.com/demo/TECHMAN.pdf>: The CRISP Consortium Ltd.