터널굴착으로 발생한 지반거동에 대한 수치해석적 분석 Numerical Analysis of Tunnelling-Induced Ground Movements

손무락¹⁾, Son, Moorak, 윤종철²⁾, Yun, Jongcheol

SYNOPSIS: Numerical analysis has been performed to estimate maximum settlement and maximum horizontal displacement due to tunnel excavation varying ground condition, tunnel depth and diameter, and construction condition (volume loss at excavation face). The maximum surface settlement from the numerical analysis has been compared with the maximum settlement at tunnel crown considering ground condition, tunnel depth and diameter, and construction condition, and it has been also compared with the maximum horizontal displacement. The results from the numerical analysis have been compared with field measurements to confirm the applicability and validity of the results and by this comparison it is believed that the numerical results in this study can be utilized practically in analyzing the ground movements due to tunnel excavation.

Keywords: Tunnel, Numerical Analysis, Settlement, Horizontal Displacement

1. 서 론

터널굴착에 있어서 어떠한 공법을 어느 깊이에서 사용하든 굴착은 이미 존재하고 있던 지반을 제거함으로서 지반변위를 동반하게 된다. 도심지에서의 터널굴착은 주변지반에 설치되어 있는 많은 구조물 및 시설물에의 영향이 최소화 되도록 굴착되어야 한다. 다양한 지층, 터널깊이 및 직경, 시공조건에 따라터널굴착에 의해 발생되는 주변지반의 거동은 서로 상이하게 나타나기 때문에 이와 같은 요소들을 고려함으로서 터널굴착으로 인해 발생된 주변지반의 거동을 보다 정확히 파악하고 이를 통해 주변구조물이나 시설물들에 발생될 수 있는 문제점을 최소화 하는 것은 매우 중요한 일이다.

터널굴착으로 인한 지표면에서의 침하곡선 예측은 현재까지 Peck (1969)이 제안한 에러함수가 자주사용되고 있다. 이 때, 터널중심부 상부 지표면에서의 최대 침하량이 이용되며, 에러함수에 근거한 지표면에서의 수평변위곡선 예측을 위해서는 지표면에서의 최대 수평변위가 필요하게 된다.

본 논문에서는 상기와 같이 터널굴착으로 인한 주변구조물 및 시설물의 손상예측을 하기 위하여 첫 단계로서 수행되는 주변지반거동 예측에 반드시 필요한 최대 침하 및 수평변위량의 산정 및 파악을 위하여 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건을 달리하는 수치해석을 수행하고 그 결과를 기존 현장계측 자료와 비교한 후 향후 터널굴착으로 발생된 주변 지반의 거동을 보다 정확히 파악하고 분석하기 위한 실무자료 및 활용방법을 제시하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

¹⁾ 대구대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daegu University

²⁾ 대구대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Daegu University

2. 지반변위 예측방법

터널굴착에 따른 지반침하를 파악하기 위해 현재까지 Peck (1969)이 제시한 경험적 방법인 에러함수 $[s = s_{max}.exp - (x^2/2i^2), 여기서 S는 침하곡선 중심에서 <math>x$ 거리만큼 떨어진 점에서의 침하량, s_{max} 는 침하곡선 중심에서 임의의 거리, i는 침하곡선상 변곡점의 위치]가 자주 사용되고 있다 (그림 1).

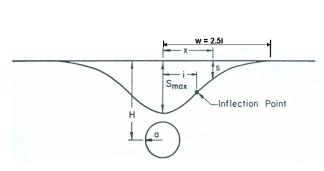


그림 1. 침하파악을 위한 에러함수 (Peck, 1969)

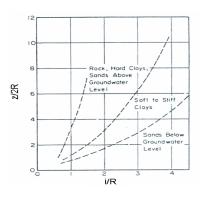


그림 2. 변곡점 위치, i의 결정

뿐만 아니라, Peck은 침하곡선의 폭 (그림 1에서 w)을 결정하는 방법을 제시하였다 (그림 2). 그림에서 터널반경(R) 및 깊이(z)와 지반종류를 알면 변곡점의 위치(i)가 결정되며, 이로부터 그림 1에서 침하폭(w=2.5i)이 용이하게 결정될 수 있다. O'reilly and New (1982)는 에러함수를 이용하여 터널굴착에따른 부피변화가 없는 지반에서 발생되는 지반변위 벡터가 터널의 중심점을 향한다는 가정하에 수평변위를 예측하는 방법 $[s_h=s_{hmax}.1.65x/i\cdot exp-(x^2/2i^2),$ 여기서 S_h 는 터널중심선상에서 x 거리만큼 떨어진 점에서의 수평변위량, s_{hmax} 는 변곡점 위치에서의 최대수평변위량, x는 터널중심선상에서 임의의 거리, i는 침하곡선상 변곡점의 위치]을 제안하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 에러함수를 이용하여 지반침하 및 수평변위를 예측하기 위해서는 최대 침하량 및 최대 수평변위량이 필요하게 되는데, 본 논문에서는 이들 자료를 제공하기 위해서 다양한 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(굴착면에서의 지반손실량)을 달리하는 수치해석을 수행하고 그 결과 및 적용방법에 대해서 제시하였다.

3. 수치해석 방법, 절차 및 제한사항

터널굴착으로 인한 주변지반의 변위를 예측하기 위해 필요한 최대 침하 및 수평변위의 산정 및 파악과 지표면에서의 전체침하량과 터널굴착면에서의 지반손실량의 비교를 위하여 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(굴착면에서의 지반손실량)을 달리하는 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 FLAC (5.0)을 이용하였으며, Mohr-Coulomb 탄·소성모델 (비관련흐름법칙 사용)을 이용하였다. 터널굴착으로 발생된 터널주변의 지반변위를 모사하기 위해서 시공조건을 고려하여 터널굴착면에 직접 변위를 부여하여 해석하는 변위제어법 (Cheng et al., 2007,그림 3참조)을 이용하였다. 지반변위를 터널굴착면에 부여할 때, 지반변위 벡터의 수렴방향은 Cheng et al.이 제시한 터널의 토피고와 직경비를 고려하여 터널의 중심점 아래 임의의 점 (터널중심으로부터 β만큼 떨어진 거리)을 향하도록 설정되었다 (그림 3, 4참조).

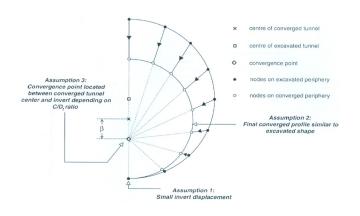


그림 3. 변위제어법에 의한 지반변위 부여방법 (Cheng et al., 2007)

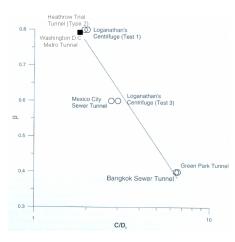


그림 4. 수렴점의 위치 결정

본 수치해석에서는 점성토 지반의 경우 시간경과에 따른 압밀침하는 고려되지 않았으며 배수상태를 가정하여 해석하였다. 단순지층조건을 가정하였고, 시공과정 및 품질은 지반손실량에 따른 터널굴착면에 부여되는 지반변위의 크기를 달리하여 고려될 수 있도록 하였다. 표 1.은 연구에 수행된 해석경우들을 정리한 것이며, 그림 5은 본 연구에서 해석을 위해 부여된 지반변위의 한 예로서 깊이 20m에 직경 6m로 굴착되는 터널굴착면에서의 지반손실량이 0.5%, 2% 및 5%일 때 적용된 지반변위를 보여주고 있다. 그림 6은 연구를 위해 해석에 사용된 요소망 및 경계조건이다.

표 1. 굴착특성 및 지반조건에 대한 매개변수 연구

터널깊이 (m)	터널직경 (m)	물성치*	지반손실, VL(%)
10	3	A, B, C	0.5, 2, 5
	6	A, B, C	0.5, 2, 5
20	3	A, B, C	0.5, 2, 5
	6	A, B, C	0.5, 2, 5
	9	A, B, C	0.5, 2, 5
30	3	A, B, C	0.5, 2, 5
	6	A, B, C	0.5, 2, 5
	9	A, B, C	0.5, 2, 5

* A: 모래질 점토에 대한 물성치: E=1,500t/m2, v=0.35, Υ=1.7t/m3, c=10t/m2, φ=20°, ψ=0°, σt=0.0t/m2, Ko=0.5 B: 점토질 모래에 대한 물성치: E=2,500t/m2, v=0.34, Υ=1.8t/m3, c=5.0t/m2, φ=25°, ψ=0°, σt=0.0t/m2, Ko=0.5 C: 자갈질 모래에 대한 물성치: E=4,000t/m2, v=0.33, Υ=1.9t/m3, c=1.0t/m2, φ=35°, ψ=5°, σt=0.0t/m2, Ko=0.5

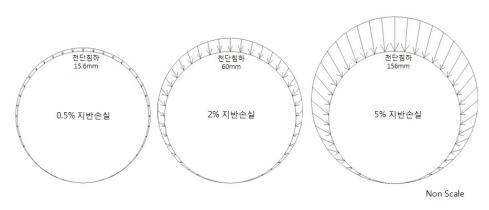


그림 5. 지반손실량에 따른 터널굴착면에 부여된 지반변위 (터널깊이 20m, 직경 6m인 경우)

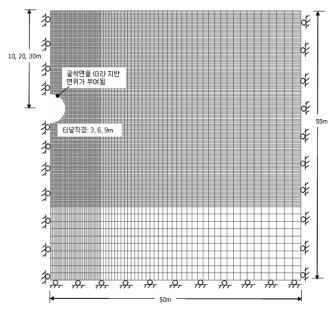


그림 6. 해석에 사용된 요소망 및 경계조건

4. 해석결과의 분석

상기 다양한 경우(72cases)들에 대해서 수치해석을 수행한 후, 그 결과를 아래와 같이 분석하였다.

4.1 최대 침하량

해석이 수행된 모든 경우들에 대해 지표면에서 발생한 최대 침하를 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 조사한 결과, 지반손실량 및 터널직경이 증가할수록 지표면에서의 침하는 터널깊이에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 지표면에서의 최대 침하는 일반적으로 자갈질 모래에서 터널직경 및 깊이, 지반손실량에 가장 큰 영향을 받았으며, 특히 자갈질 모래에서 깊이 10m에 굴착되는 저층터널은 굴착직경이 3m이고 지반손실량이 5%일 때 붕괴(소성영역의 지표면까지의 확대로 인한 지반변위의 갑작스런증가)가 발생하였으며, 굴착직경이 6m로 증가할 경우에는 지반손실량이 2%가 발생한 경우에도 붕괴가 일어날 수있다는 것을 보여주고 있다. 뿐만 아니라, 터널깊이가 보다 깊어지더라도 지반손실량이 커지면 터널이 붕괴될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과들로부터 터널굴착에 의해 발생하는 최대 침하는 터널 깊이가 얕고, 지반손실량이 크며, 지반이 느슨하고 점착성이 작은 지반에서 크게 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7-9는 붕괴가 발생한 경우를 제외한 모든 경우들에 대한 해석결과로부터 지표면에서의 최대 침하와 터널천단부에서의 최대 침하 비(s_{max}/s_c)를 터널깊이와 직경의 비(Z/D)를 기준으로 비교한 것이다. Hong (1984)은 다양한 현장자료를 토대로 침하비 및 깊이/직경 비의 관계를 지반에 따라 조사하였으나 (그림 10참조), 현장별 시공조건(지반손실량)을 고려하지 않아 기타현장에 적용함에 있어서 시공조건을 반영하지 못하는 점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 토대로 현장자료를 재분석하여 지반조건 별로 지반손실량을 고려한 후 수치해석 결과와 비교하였다.

그림 7은 지반손실량 (V_L) 이 0.5%에 해당하는 것으로서 침하비는 깊이/직경 비가 증가할수록 모든 지반조건에 대해 비선형적으로 뚜렷하게 감소하며 터널깊이/직경 비가 작은 값에서 침하비는 보다 급하게 감소하다가 깊이/직경 비가 점점 증가할수록 침하비의 감소는 점점 둔화된다는 것을 알 수 있다. 지반조

건별로는 큰 차이가 발생되지는 않았지만 전반적으로 자갈질 모래층에서 침하비가 가장 크게 나타났으며 모래질 점토에서 가장 작게 나타나는 경향이 있었다.

그림 8은 지반손실량(V_L)이 2%에 해당하는 것으로서 침하비는 터널깊이/직경 비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내지만 지반손실량이 0.5%인 경우와 비교해서 지반 및 터널깊이에 보다 의존적으로 나타났다. 뿐만 아니라 터널깊이가 증가할수록 침하비가 보다 작은 터널깊이/직경 비에서 수렴하는 경향이 있었다. 자갈질 모래층은 붕괴가 가장 잘 발생하는 반면에 붕괴가 발생하기 전에는 변형이 가장 작게 발생하는 특징이 있었다. 이와 같은 현상은 자갈질 모래는 비록 마찰각이 상대적으로 다른 지반에 비해큰 값을 가지더라도 본 연구의 해석조건에서는 전단강도에 보다 큰 영향을 미치는 점착력이 상대적으로 작아 파괴가 쉽게 일어날 수 있지만, 파괴전에는 자갈질 모래가 다른 지반조건에 비해 상대적으로 큰 변형계수를 가짐으로서 보다 작은 침하를 나타내는 것으로 판단된다.

그림 9는 지반손실량(V_L)이 5%에 해당하는 것으로서 침하비는 터널깊이/직경 비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내지만 지반손실량이 2%인 경우에서와 마찬가지로 지반 및 터널깊이에 의존적인 것으로 나타났다. 전반적으로 터널깊이가 증가할수록 침하비의 값이 보다 크게 나타나는 경향이 있었다. 터널깊이/직경 비가 증가할수록 침하비는 지반손실량이 2%인 경우와 비교해 터널깊이에 보다 크게 의존하는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 10m의 저층터널에는 모래질 점토와 점토질 모래의 침하비가 지반손실량이 2%인 경우와 비교해 더욱 뚜렷하게 나타나는 경향이 있었다. 20m와 30m 깊이의 터널에서는 붕괴가 된 경우를 제외하면 지반손실량이 2%인 경우와 마찬가지로 자갈질 모래가 가장 작은 침하비의 값을 나타내었고 모래질 점토와 점토질 모래의 차이는 거의 발생하지 않았다.

지반손실량에 따른 침하비와 터널깊이/직경 비를 비교해 보면 지반손실량이 증가할 수록 터널깊이와 직경비에 따른 침하비가 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 터널깊이/직경 비가 점점 작은 값에서 침하 비가 수렴하는 것으로 나타났다. 상기에서 조사된 바와 같이, 터널굴착에 따른 지표면에서의 최대침하와 터널천단에서의 천단침하 비는 지반손실량에 따라 서로 다르게 나타났으며, 이러한 결과로부터 향후 지 표면에서의 최대 침하는 시공조건이 반영된 지반손실량을 고려하여 추정하여야 할 것으로 판단된다.

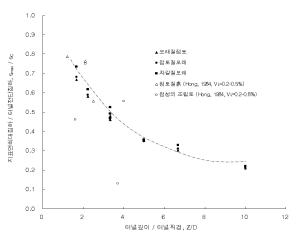


그림 7. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계 (지반손실량 0.5%)

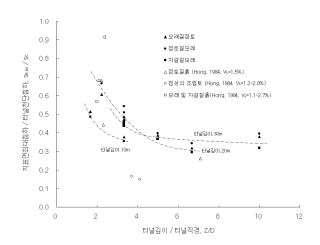


그림 8. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계 (지반손실량 2%)

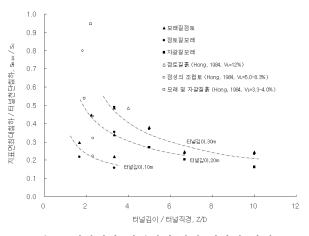


그림 9. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계 (지반손실량 5%)

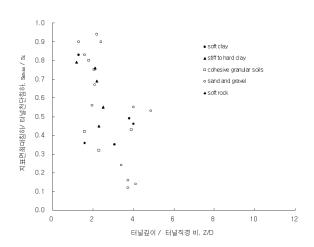


그림 10. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계 (Hong, 1984)

4.2 최대 수평변위량

해석이 수행된 모든 경우들에 대해 지표면에서 발생한 최대 수평변위를 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 조사한 결과, 발생된 최대 수평변위에 대한 조건별 경향은 지표면에서의 최대 침하의 경향과 유사한 특징을 나타내었다. 다시 말해서, 지반손실량이 작고 터널직경이 작을수록 발생된 지표면에서의 최대 수평변위는 터널깊이에 크게 영향을 받지 않았으나, 지반손실량 및 터널직경이 증가할수록 지표면에서 발생된 수평변위는 터널깊이에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 자갈질 모래에서 가장 뚜렷하게 나타났고 모래질 점토에 가장 약하게 나타났다.

그림 11은 붕괴가 발생한 경우를 제외한 모든 경우에 대해 조사된 지표면에서 발생된 최대 침하와 최대 수평변위의 관계를 나타내며, 최대 수평변위는 최대 침하의 약 35% 정도가 된다는 것을 알 수 있다. 이는 여러 선행연구자 (Cording and Hansmire, 1975, Attewell, 1978, Hong and Bae, 1995)가 현장조사 및 모델실험 자료를 토대로 제시한 약 25% ~ 40%의 범위에 있다는 결과와 매우 일관성이 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 할 때, 본 연구의 결과인 최대 침하와 최대 수평변위의 관계는 향후 터널굴착 유발주변지반의 최대 수평변위를 최대 침하로부터 예측함에 있어서 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

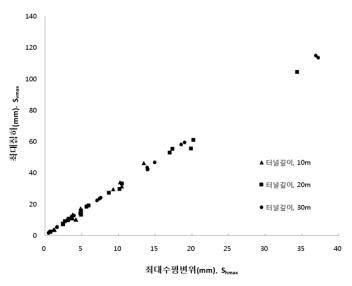


그림 11. 최대 침하 및 최대 수평변위의 관계

5. 결 론

터널굴착으로 인한 지표면에서의 최대 침하 및 최대 수평변위량의 산정 및 파악을 위하여 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(굴착면에서의 지반손실량)을 달리하는 수치해석을 수행하고 그 결과를 기존 현장계측자료와 비교한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터널굴착에 의해 발생하는 최대 침하는 터널깊이가 얕고 지반손실량이 크며, 지반이 느슨하고 점착성이 작은 지반에서 크게 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로 침하비는 터널깊이/직경 비가 증가할수록 모든 지반조건에 대해 비선형적으로 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 터널깊이/직경 비가 작은 값에서는 침하비는 보다 급하게 감소하다가 깊이/직경 비가 점점 증가할수록 침하비의 감소는 점점 둔화 된다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 지반손실량에 따른 침하비와 터널깊이/직경 비를 비교해 보면 지반손실량이 증가할수록 터널깊이/직경 비에 따른 침하비가 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 터널깊이/직경 비가 점점 작은 값에서 침하비가 수렴하는 것으로 나타났다. 수치해석 조건에서의 지반손실량과 비슷한 범위의 현장계측자료를 서로 비교한 결과, 수치해석결과가 현장계측결과의 범위내에서 일관성있게 나타났으며 이로부터 향후 지표면에서의 최대 침하는 지반손실량을 고려한 본 연구의 결과를 활용하여 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 지표면에서 발생한 최대 침하 및 최대 수평변위의 관계는 지반조건, 터널깊이 및 직경, 지반손실량에 관계없이 일관성을 가지고 거의 선형관계를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 최대 수평변위는 최대침하의 약 35% 정도가 되는 것으로 나타났다. 이는 여러 선행연구자가 현장조사 및 모델실험 자료를 토대로 제시한 약 25% ~ 40%의 범위 내에 있다는 결과와 매우 일관성이 있음을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 결과를 토대로 본 연구에서 얻어진 최대 침하와 최대 수평변위의 관계를 향후 터널굴착 유발주변지반의 최대 수평변위를 최대 침하로부터 예측함에 있어서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1. 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 method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, pp. 450-466.
- 2. Clough, G. W. and Leca, E. (1989) With focus on use of finite element methods for soft ground tunneling, Review paper in Tunnels et Micro-Tunnels en Terrain Meuble-du Chantier a la Theorie, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, pp. 531-573.
- 3. Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975) Displacements around soft ground tunnels, General Report, Session 4, 5th Panamerican Cong. on Soil Mech. and Foun. Engr. Buenos Aires, November.
- 4. Cording, E. J., Hansmire, W. H., MacPherson, Lenzini, P. A., and Vonderohe, A. D. (1976) Displacements around tunnels in soil. *Report by the University of Illinois at Urbana-Champaign for the U.S. Dept. of Transportation*, No. DOT-TST-76T-22.
- 5. Cording, E. J. (1991) Control of ground movements around tunnels in soil, *Ninth Pan American Conference*, Vina del Mar, Chile. Sociedad Chilena de Geotechina, Vol. 4, pp. 2195–2244.
- 6. Hong, S. W. and Bae, G. J. (1995) Ground movements associated with subway tunneling in Korea, *Underground Construction in Soft Groundt (eds. K. Fujita and O. Kusakabe)*, Balkema, pp. 229–232.

- 7. Hong, S. W. (1984) *Ground movements around model tunnels in sand*, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. USA.
- 8. Loganathan, N. and Poulous, H. G. (1998) Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays, *J. of Geote. and Geoen. Engr.*, Vol. 124 (9), USA, pp. 846-856.
- 9. Moeller, S. C. and Vermeer, P. A. (2008) On numerical simulation of tunnel installation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 461-475.
- 10. O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982) Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and effects, *Tunnelling '82*, M. J. Jones, ed., London, England, pp. 173–181.
- 11. Peck, R. B. (1969) Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc. 7th Int'l Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr.*, Mexico City, State-of-the-Art, pp. 225-290.