

터널굴착으로 발생한 지반거동에 대한 수치해석적 분석

손무락^{1*}, 윤종철²

Numerical analysis of tunnelling-induced ground movements

Moorak Son, Jongcheol Yun

Abstract Numerical analysis has been performed to estimate maximum settlement, maximum horizontal displacement and total settlement volume at the ground surface 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. In addition, the volume loss (V_L) at tunnel excavation face has been compared with the total surface settlement volume (V_s) with the variation of ground condition, tunnel depth, and tunnel diameter. 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, ground loss

요 지 본 논문에서는 터널굴착으로 발생한 지표면에서의 최대 침하 및 수평변위와 총 침하부피량을 추정하기 위하여 서로 상이한 지층에서 다양한 깊이 및 직경, 서로 다른 시공조건(지반손실량)을 가진 터널에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과로부터 얻어진 지표면에서의 최대 침하량은 터널 굴착부 천단에서의 최대 침하량과 지층별, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 비교되었으며, 또한 지표면에서의 최대 침하량은 지표면에서의 최대 수평변위량과도 비교하였다. 뿐만 아니라, 터널굴착부에서 발생한 지반손실량(V_L)과 지표면에서 형성된 총 침하부피량(V_s)을 지층 및 터널깊이와 직경을 달리하여 상호 비교하였다. 수치해석을 통해 얻어진 결과는 그 적용성과 타당성을 검증하기 위하여 기존 현장계측자료와의 비교가 수행되었으며, 이를 통해 본 연구의 수치해석 결과가 향후 터널굴착으로 발생된 주변 지반의 거동을 파악하고 분석하는 실무자료로서 활용될 수 있다는 것을 파악하였다.

주요어: 터널, 수치해석, 침하, 수평변위, 지반손실

1. 서 론

터널굴착은 지하에서의 운송수단 및 상·하수구, 가스관, 전력구, 통신구와 같은 시설물들을 설치하기 위해서 지표면아래 작게는 수 미터에서 크게는 수 십 미터에서 이루어지며, 굴착방법 또한 NATM, Shield, TBM 등 여러 가지가 사용되고 있다. 어떠한 방법을 어느 깊이에서 사용하든 굴착은 이미 존재하고 있던 지반을 제거함으로써 지반변위를 동반하게 된다. 산악지역에서의 도로 등의 건설을 위한 터널굴착과는 달리 도심지에서의 터널굴착은 주변지반에 설치되어 있는 많은 구조물 및 시설물의 영향이 최소화되도록 굴착되어야 한다. 특히, 다양

한 지층, 다양한 터널깊이 및 직경, 시공조건 등에 따라 터널굴착에 의해 발생하는 주변지반의 거동도 서로 상이하게 나타나기 때문에 이와 같은 요소들을 고려함으로써 터널굴착으로 인해 발생된 주변지반을 보다 정확히 파악하고 이를 통해 주변구조물이나 시설물들에 발생될 수 있는 문제점을 최소화하는 것은 매우 중요한 일이다.

도심지에서의 터널굴착과 관련한 주변구조물 및 시설물들의 손상예측을 위한 첫 단계는 터널굴착으로 인해 주변지반에서 발생한 침하 및 수평변위를 파악하는 것이며, 다음 단계로서, 발생된 지반변위에 대해 구조물 및 시설물의 특성 등을 반영하여 지반-구조물 상호작용이 고려된 구조물 및 시설물에서의 손상예측을 파악하는 것이다. 다시 말해서, 터널굴착으로 인한 주변지반의 거동파악은 그 첫 단계로서 매우 중요하며 보다 신뢰성 있는 지반거동에 대한 예측은 주변구조물이나 시설물의

¹정회원, 대구대학교 토목공학과 교수, 공학박사/기술사

²대구대학교 토목공학과 석사과정

*교신저자: 손무락 (E-mail: mson@daegu.ac.kr)

손상예측을 보다 확실시 하는 것과 직접적으로 연관된다. 터널은 고려되는 목적을 위하여 서로 다른 직경을 가지고 서로 다른 깊이에서 굴착되게 될 뿐만 아니라, 터널이 굴착되는 지반조건 및 시공조건은 서로 상이한 경우가 대부분이므로 주변지반의 거동예측은 앞서 언급한 바와 같이 이와 같은 요소들이 반드시 고려되어야 한다. 뿐만 아니라, 굴착형태나 굴착공법의 영향(유충식 등)도 또한 고려되어야 할 것으로 판단된다.

터널굴착으로 인한 지표면에서의 침하곡선 예측은 현재까지 Peck(1969)이 제안한 에러함수가 자주 사용되고 있으며, 이 때, 터널중심부 상부 지표면에서의 최대 침하량이 이용되게 된다. 뿐만 아니라, 에러함수에 근거한 지표면에서의 수평변위곡선 예측을 위해서는 지표면에서의 최대 수평변위가 필요하게 된다. 지표면에서의 최대 침하량은 침하곡선의 폭과 침하곡선으로 둘러싸인 전체면적을 알 수 있다면 구할 수 있으므로, 지표면에서의 전체침하량을 파악하는 것이 중요하다. 더불어 지표면에서의 최대 수평변위는 지표면에서의 최대 침하와 직접적으로 연관이 있으므로 이들의 관계를 파악하는 것도 또한 중요하다.

본 논문에서는 상기와 같이 터널굴착으로 인한 주변구조물 및 시설물의 손상예측을 하기 위하여 첫 단계로서 수행되는 주변지반거동 예측에 반드시 필요한 최대 침하 및 수평변위, 지표면에서의 전체침하량의 산정 및 파악을 위하여 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건[굴착면에서의 지반손실량(터널단위길이당 실제굴착부피량/터널단위길이당 이론적 굴착부피량 × 100%)]을 달리하는 수치해석을 수행하고 그 결과를 기존 현장계측자료와 비교한 후 향후 터널굴착으로 발생된 주변 지반의 거동을 보다 정확히 파악하고 분석하기 위한 실무자료 및 활용 방법을 제시하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

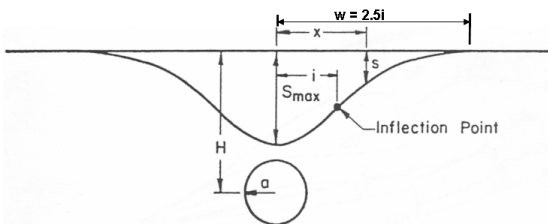


그림 1. 침하파악을 위한 에러함수(Peck, 1969)

2. 지반변위 예측방법

터널굴착 유발 지반변위가 주변 구조물 및 시설물에 미치는 영향을 평가하기 위해선 먼저 구조물이 위치하고 있는 곳에서의 지반변위가 예측되어야 한다. 지반변위 예측은 지반침하뿐만 아니라 수평변위도 포함하여야 한다. 왜냐하면 구조물이 자중만에 의해 침하될 때 구조물에 손상이 발생하는 메커니즘과는 달리 터널굴착으로 인한 주변지반은 수직침하뿐만 아니라 상당한 크기의 수평지반변위가 발생되는데, 이러한 수평변위는 주변구조물 및 시설물에 보다 큰 손상을 발생시킬 수 있는 요인이 된다.

터널굴착에 따른 지반침하를 파악하기 위해 현재까지 Peck(1969)이 제시한 경험적 방법인 에러함수가 자주 사용되고 있다. Peck은 다양한 토질에 대한 총 18개의 지반침하 자료를 토대로 터널굴착에 따른 지반침하 파악을 위한 에러함수 $[s = S_{max} \cdot \exp -(x^2/2i^2)]$, 여기서 S는 침하곡선 중심에서 x 거리만큼 떨어진 점에서의 침하량, S_{max} 는 침하곡선 중심에서의 최대침하량, x는 침하곡선 중심에서 임의의 거리, i는 침하곡선상 변곡점의 위치를 제시하였다(그림 1).

뿐만 아니라, 토사 및 암반지반을 포함한 총 17개의 자료를 토대로 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 용이하

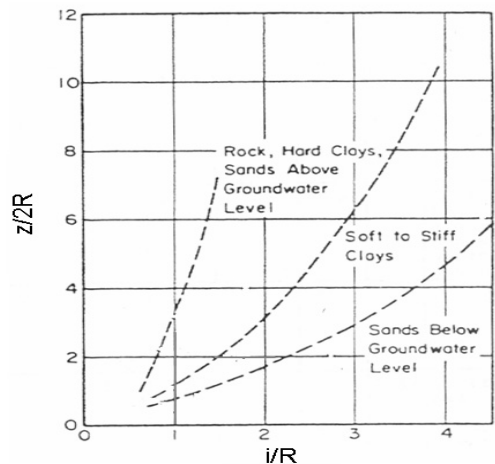


그림 2. 변곡점 위치, i의 결정

게 결정될 수 있다. 상기에서 본 바와 같이 터널굴착에 따른 침하곡선의 폭은 변곡점의 위치(i)에 따라 결정될 수 있다는 것을 알 수 있으며 다양한 연구자에 의한 변곡점의 결정방법을 표 1에 요약하여 정리하였다.

O'reilly and New(1982)는 에러함수를 이용하여 터널굴착에 따른 후피변화가 없는 지반에서 발생하는 지반변위 벡터가 터널의 중심점을 향한다는 가정하에 수평변위를 예측하는 방법 $[S_h = S_{hmax} \cdot 1.65x/i \cdot \exp -(x^2/2i^2)]$, 여기서 S_h 는 터널중심선상에서 x 거리만큼 떨어진 점에서의 수평변위량, S_{hmax} 는 변곡점 위치에서의 최대수평변위량, x는 터널중심선상에서 임의의 거리, i는 침하곡선상 변곡점의 위치를 제안하였다. Cording(1991)은 상기 수평변위 예측식을 이용할 경우, 침하곡선의 가장자리 부근에서의 수평변위는 실측치보다 작게 나타났다고 보고한 바 있으며, 이외에도 에러함수를 이용한 침하 예측이 경우에 따라서 맞지 않다는 보고가 있어왔다.

상기에서 언급한 지반침하를 예측하거나 수평변위를 예측하기 위해 이용되는 에러함수는 처음으로 Martos(1958)가 광산지역 굴착으로 인해 발생한 지표면에서의 침하에 대한 통계학적 분석을 토대로 제시하였으며, 이후 Peck과 Schmidt(1969)가 이 제안식을 연약지반에서의 터널굴착에 따른 지표면에서의 침하를 예측하는데 적용시켰다. 하지만, 광산굴착은 일반적으로 도심지에서의 일반적인 터널보다 지표면 아래 보다 깊은 곳에서 이루어지므로 광산굴착 자료에 근거한 에러함수는 상대적으로 얕은 곳에서 굴착되는 도심지터널의 굴착에 대한 지반변위를 예측하기 위해 이용될 때 주

의 깊은 고려가 있어야 함에도 불구하고 여전히 많이 이용되고 있다. 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, 해석에 사용된 지반모델은 Mohr-Coulomb 탄·소성모델(비관련흐름법칙 사용)을 이용하였다. 터널굴착으로 발생한 터널주변의 지반변위를 모사하기 위해서 시공조건을 고려하여 터널굴착면에 직접 변위를 부여하여 해석하는 변위제어법(Cheng et al., 2007, 그림 3 참조)을 이용하였다. 변위제어법에 의한 방법은 터널굴착면을 따라 발생하는 지반변위가 터널중심축상의 어느 한 점을 향하도록 변위를 부여하는 방법으로서 그림 3에서 설명되어진다. 지반변위를 터널굴착면에 부여할 때, 지반변위 벡터의 수렴방향은 Cheng et al.이 제시한 터널

표 1. 여러 연구자에 의한 변곡점의 위치결정 방법

연구자	제안식(i = 변곡점위치, z_0 = 터널깊이, R = 터널반경)	관련근거 및 적용지반
Peck (1969)	$i/R = (z_0 / 2R)^n$ (n = 0.8 - 1.0)	현장조사
Attewell and Farmer (1974)	$i/R = (z_0 / 2R)^n$ (n = 1.0)	단단한 점토에 대한 현장조사
Atkinson and Potts (1977)	$i = 0.25(z_0 + R)$	느슨한 모래의 현장조사 및 모델실험
	$i = 0.25(1.5z_0 + 0.5R)$	조밀한 모래 및 과압밀점토의 현장조사 및 모델실험
Clough and Schmidt (1981)	$i/R = (z_0 / 2R)^n$ (n = 0.8)	일반점토에 대한 현장조사
O'Reilly and New (1982)	$i = 0.43z_0 + 1.1$ m	터널깊이가 3 m 보다 크고 34 m 보다 작은 점토지반에 대한 현장조사
	$i = 0.28z_0 - 0.1$ m	터널깊이가 6 m 보다 크고 10 m 보다 작은 조립토
Mair et al. (1984)	$i = 0.5z_0$	현장조사 및 원심력모델실험

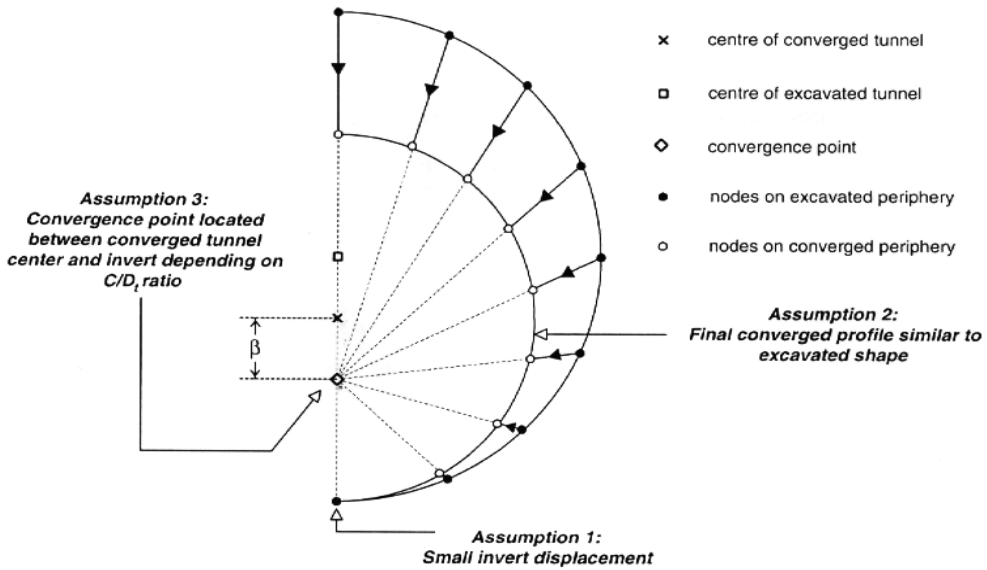


그림 3. 변위제어법에 의한 지반변위 부여방법(Cheng et al., 2007)

의 토피고와 직경비를 고려하여 터널의 중심점 아래 임의의 점(터널중심으로부터 β 만큼 떨어진 거리)을 향하도록 설정되었다(그림 3, 4 참조). 일반적으로 터널의 깊이가 매우 깊다면 터널굴착면을 따라 발생하는 지반변위 벡터는 터널의 중심축을 향해 수렴하지만, 터널의 깊이가 점점 얕아짐에 따라 지반변위 벡터는 터널중심 아래의 인버트부에 점점 가까운 어느 한 점을 향해 수렴되게 된다. 하지만, 터널 인버트부가 침하하지 않는 한 수렴점은 인버트부 아래로는 내려갈 수 없다. 달리 말해서, 터널굴착면을 따라 발생하는 지반변위 벡터는 터널중심과 인버트부 사이의 어느 한 점을 향해 수렴되게 발생한다(Cheng et al., 2007). Cheng et al.에 의하면 수렴점의 위치 β (터널중심으로부터 거리, 즉 터널반경에 대한 비율, $\beta=0$ 이면 수렴점이 터널중심에 위치, $\beta=1$ 이면 수렴점이 터널 인버트부에 위치)는 터널토피고(C)와 직경(D)의 비, 즉 C/D_r 를 이용하여 구할 수 있다고 보고하였다. 이러한 방법을 토대로 해석된 결과를 여러 현장에서 측정된 지반변위와 비교하여 비교적 잘 일치한다고 보고하였다(그림 4 참조). 이렇게 함으로서 발생된 터널주변의 변위형태는 Lee et al.(1992)이 제시한 터널굴착면에서의 다양한 이유로 발생된 변위형태와 유사한 모양을 가지고 있다(그림 5). 본 수치해석에서는 점성토 지반의

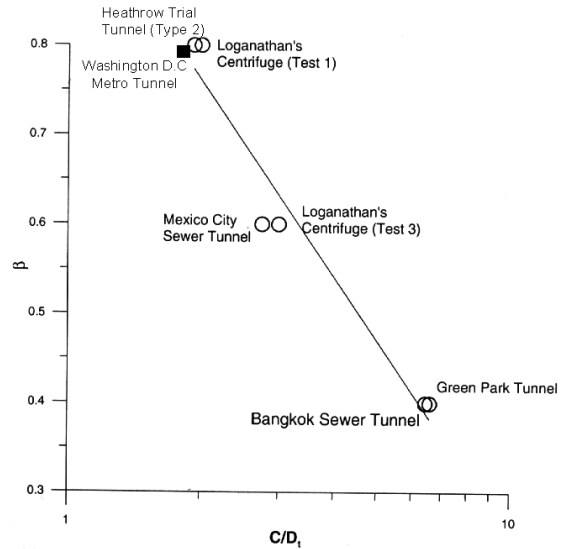


그림 4. 수렴점의 위치 결정

경우 시간경과에 따른 압밀침하는 고려되지 않았으며 배수상태를 가정하여 해석하였다. 따라서, 압밀침하가 예상되는 지반에서는 이에 대한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 수치해석을 통한 매개변수 해석은 변수들의 변화에 대한 거동차이를 파악하는데

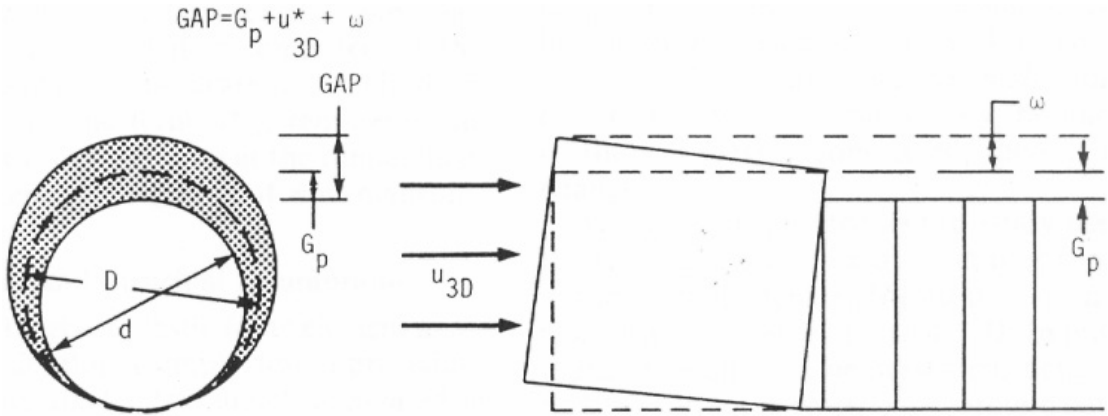


그림 5. 터널굴착에 따른 굴착면에서의 지반손실(Lee et al., 1992)

표 2. 굴착특성 및 지반조건에 대한 매개변수 연구

터널깊이(m)	터널직경 (m)	물성치*	지반손실, $V_L(\%)$
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: $E = 1,500 \text{ t/m}^2$, $\nu = 0.35$, $\gamma = 1.7 \text{ t/m}^3$, $c = 10 \text{ t/m}^2$, $\phi = 20^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $\sigma_t = 0.0 \text{ t/m}^2$, $K_0 = 0.5$
 B: 점토질 모래에 대한 물성치: $E = 2,500 \text{ t/m}^2$, $\nu = 0.34$, $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$, $c = 5.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 25^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $\sigma_t = 0.0 \text{ t/m}^2$, $K_0 = 0.5$
 C: 자갈질 모래에 대한 물성치: $E = 4,000 \text{ t/m}^2$, $\nu = 0.33$, $\gamma = 1.9 \text{ t/m}^3$, $c = 1.0 \text{ t/m}^2$, $\phi = 35^\circ$, $\psi = 5^\circ$, $\sigma_t = 0.0 \text{ t/m}^2$, $K_0 = 0.5$

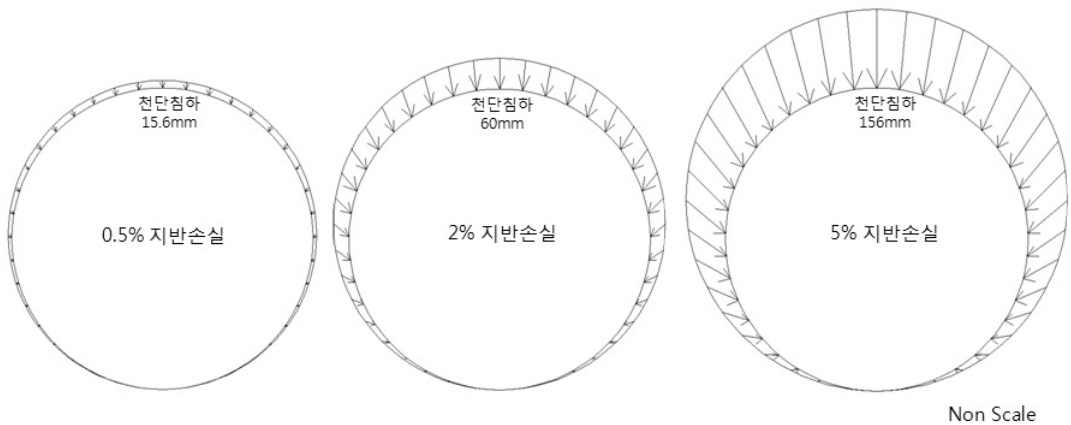


그림 6. 지반손실량에 따른 터널굴착면에 부여된 지반변위(터널깊이 20 m, 직경 6 m인 경우)

용이한 점이 있지만, 복잡한 지층조건, 전반적인 시공과정 및 시공품질 등과 같은 요소들을 완전하게 고려하기에는 어려운 점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 단순지층조건을 가정하였고, 시공과정 및 품질은 지반손실량에 따른 터널굴착면에 부여되는 지반변위의 크기를 달리하

여 고려될 수 있도록 하였다.

표 2는 연구에 수행된 해석경우들을 정리한 것이며, 그림 6은 본 연구에서 해석을 위해 부여된 지반변위의 한 예로서 깊이 20 m에 직경 6 m로 굴착되는 터널굴착면에서의 지반손실량이 0.5%, 2% 및 5%일 때 적용된 지반변위를 일례를 보여주고 있다. 그림 7은 연구를 위해 해석에 사용된 요소망 및 경계조건을 보여주고 있다.

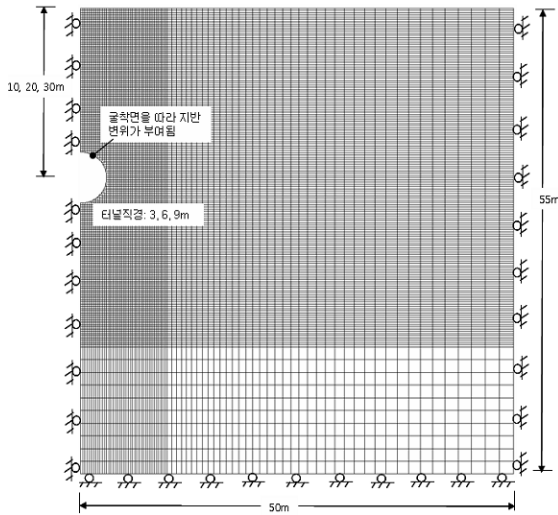


그림 7. 해석에 사용된 요소망 및 경계조건

4. 해석결과의 분석

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

4.1 최대 침하량

그림 8은 해석이 수행된 모든 경우들에 대해 지표면에서 발생한 최대 침하를 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 나타낸 것이다. 일반적으로 지반손실량이 작고 터널직경이 작을수록 지표면에서의 최대 침하는 터널깊이에 크게 영향을 받지 않았다. 하지만, 지반손실량 및 터널직경이 증가할수록 지표면에서의 침하는 터널깊이에 비례하여 증가하는 경향을 나타

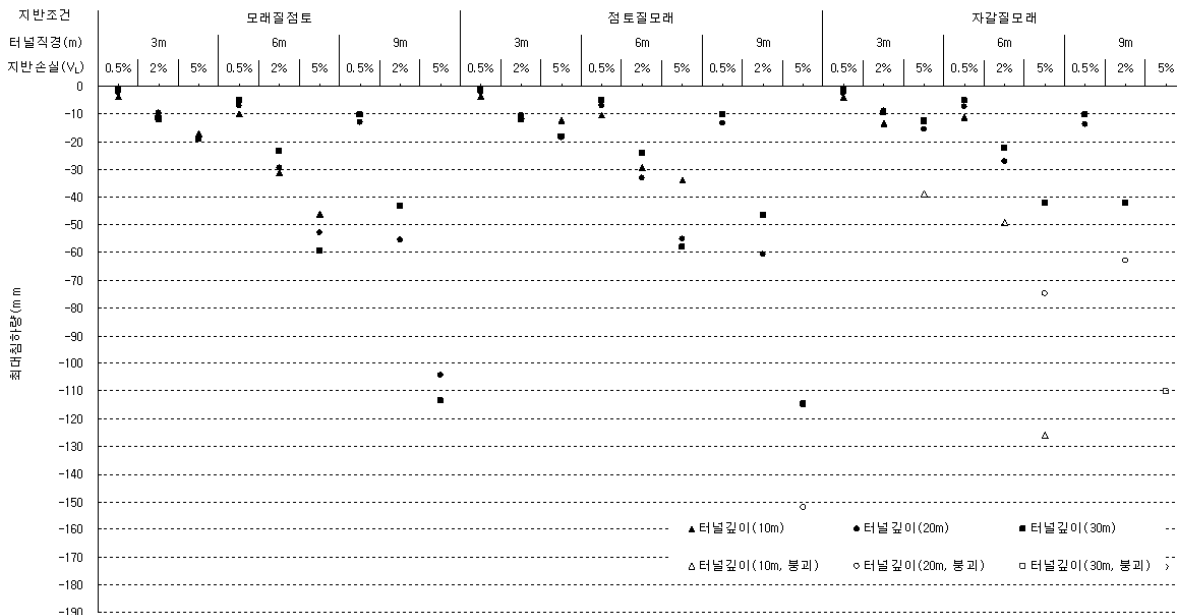


그림 8. 지반조건, 터널직경 및 깊이, 지반손실량에 따른 지표면 최대 침하 비교

내었다. 지표면에서의 최대 침하는 일반적으로 자갈질 모래에서 터널직경 및 깊이, 지반손실량에 가장 큰 영향을 받았으며, 모래질 점토에서 가장 작은 영향을 나타내었다. 특히 자갈질 모래에서 깊이 10 m에 굴착되는 저층터널은 굴착직경이 3 m이고 지반손실량이 5%일 때 붕괴(소성영역의 지표면까지의 확대로 인한 지반변위의 갑작스런 증가)가 발생하였으며, 굴착직경이 6 m로 증가할 경우에는 지반손실량이 2%가 발생한 경우에도 붕괴가 일어날 수 있다는 것을 보여주고 있다. 뿐만 아니라, 터널깊이가 보다 깊어지더라도 지반손실량이 커지면 터널이 붕괴될 수 있다는 것을 상기 그림으로부터 알 수 있다. 이와 같은 결과들로부터 터널굴착에 의해

발생하는 최대 침하는 터널깊이가 얇고, 지반손실량이 크며, 지반이 느슨하고 점착성이 작은 지반에서 크게 발생할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9-11은 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 서로 비교한 것이다. Hong (1984)은 다양한 현장자료를 토대로 침하비 및 깊이/직경 비의 관계를 지반에 따라 조사하였으나(그림 12 참조), 현장별 시공조건(지반손실량)을 고려하지 않아 기 타현장에 적용함에 있어서 시공조건을 반영하지 못하는 점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 토대로 현

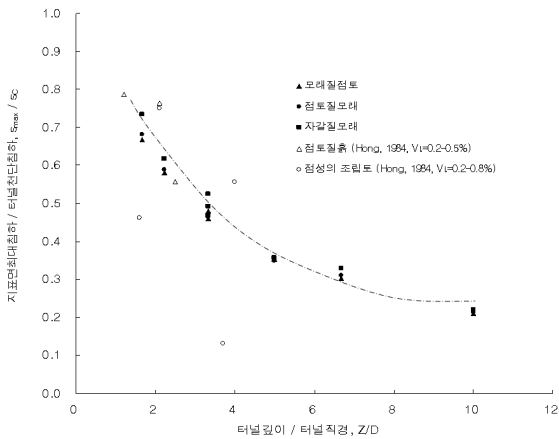


그림 9. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계(지반손실량 0.5%)

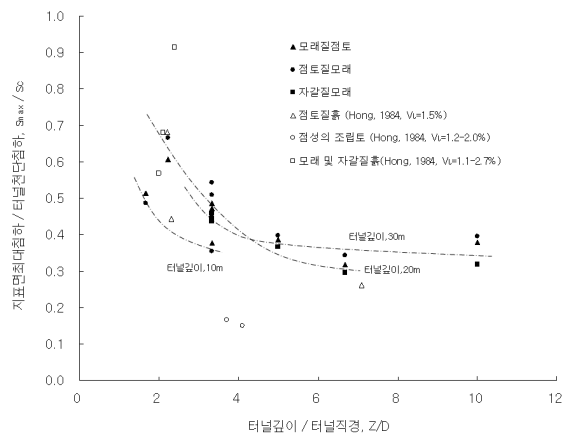


그림 10. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계(지반손실량 2%)

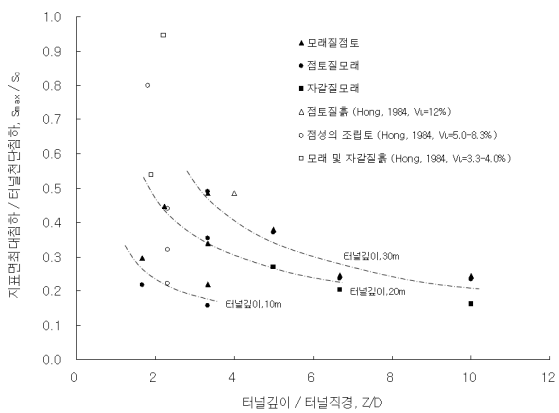


그림 11. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계(지반손실량 5%)

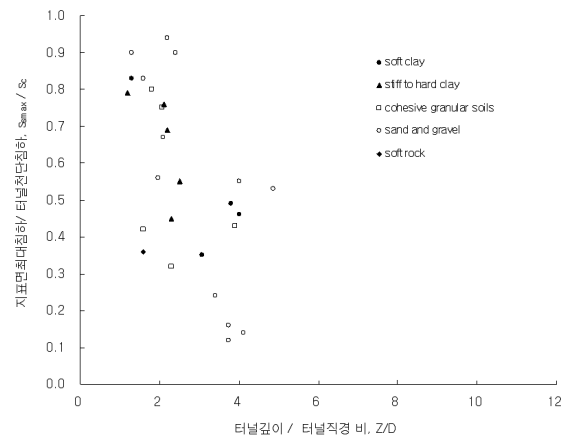


그림 12. 침하비와 터널깊이/직경 비와의 관계(Hong, 1984)

장자료를 재분석하여 지반조건별로 지반손실량을 고려한 후 수치해석 결과와 비교하였다.

그림 9는 지반손실량(V_L)이 0.5%에 해당하는 것으로서 침하비는 깊이/직경 비가 증가할수록 모든 지반조건에 대해 비선형적으로 뚜렷하게 감소한다는 것을 알 수 있다. 터널깊이/직경 비가 작은 값에서 침하비는 보다 급하게 감소하다가 깊이/직경 비가 점점 증가할수록 침하비의 감소는 점점 둔화된다는 것을 알 수 있다. 지반조건별로는 큰 차이가 발생되지는 않았지만 전반적으로 자갈질 모래층에서 침하비가 가장 크게 나타났으며 모래질 점토에서 가장 작게 나타나는 경향이 있었다. 본 수치해석 조건에서의 지반손실량과 비슷한 범위(0.2~0.8%)의 지반손실이 발생한 현장자료를 동일한 그림상에 나타내어 수치해석결과와 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 수치해석결과가 현장계측결과와의 범위내에서 일관성있게 나타남을 알 수 있다.

그림 10은 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. 이러한 경향은 그림에 나타난 경향곡선으로부터 쉽게 파악할 수 있으며 전반적으로 터널깊이가 증가할수록 침하비의 값이 보다 크게 나타나는 경향이 있었다. 이와 같은 현상은 본 연구에서 사용된 지반이 상대적으로 압축성 경향이 있어 터널상부의 지반이 보다 큰 압축을 경험하였기 때문으로 판단된다. 뿐만 아니라 터널깊이가 증가할수록 침하비가 보다 작은 터널깊이/직경 비에서 수렴하는 경향이 있었다. 지반조건별로 비교를 해 보면, 전반적으로 뚜렷한 차이를 나타내지는 않으나 10 m의 저층터널에서는 붕괴된 자갈질 모래를 제외하고는 모래질 점토가 점토질 모래보다 약간 큰 침하비의 값을 나타내었으며, 20 m와 30 m 깊이의 터널에서는 붕괴가 된 경우를 제외하면 자갈질 모래가 가장 작은 침하비의 값을 나타내었고 점토질 모래가 상대적으로 가장 큰 침하비의 값을 나타내었다. 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 비해 큰 값을 가지더라도 본 연구의 해석조건에서는 전단강도에 보다 큰 영향을 미치는 점착력이 상대적으로 작

아 파괴가 쉽게 일어날 수 있지만, 파괴전에는 자갈질 모래가 다른 지반조건에 비해 상대적으로 큰 변형계수를 가짐으로서 보다 작은 침하를 나타내는 것으로 판단된다. 본 수치해석 조건에서의 지반손실량과 비슷한 범위(1.1~2.7%)의 지반손실이 발생한 현장자료를 동일한 그림상에 나타내어 수치해석결과와 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 수치해석결과가 현장계측결과와의 범위내에서 일관성있게 나타남을 알 수 있다.

그림 11은 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. 이러한 사실은 그림에 나타난 경향곡선으로부터 쉽게 파악할 수 있으며 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 10 m의 저층터널에는 모래질 점토와 점토질 모래의 침하비가 지반손실량이 2%인 경우와 비교해 더욱 뚜렷하게 나타나는 경향이 있었다. 20 m와 30 m 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. 본 수치해석 조건에서의 지반손실량과 비슷한 범위(3.3~12%)의 지반손실이 발생한 현장자료를 동일한 그림상에 나타내어 수치해석결과와 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 수치해석결과가 현장계측결과와의 범위내에서 일관성있게 나타남을 알 수 있다.

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

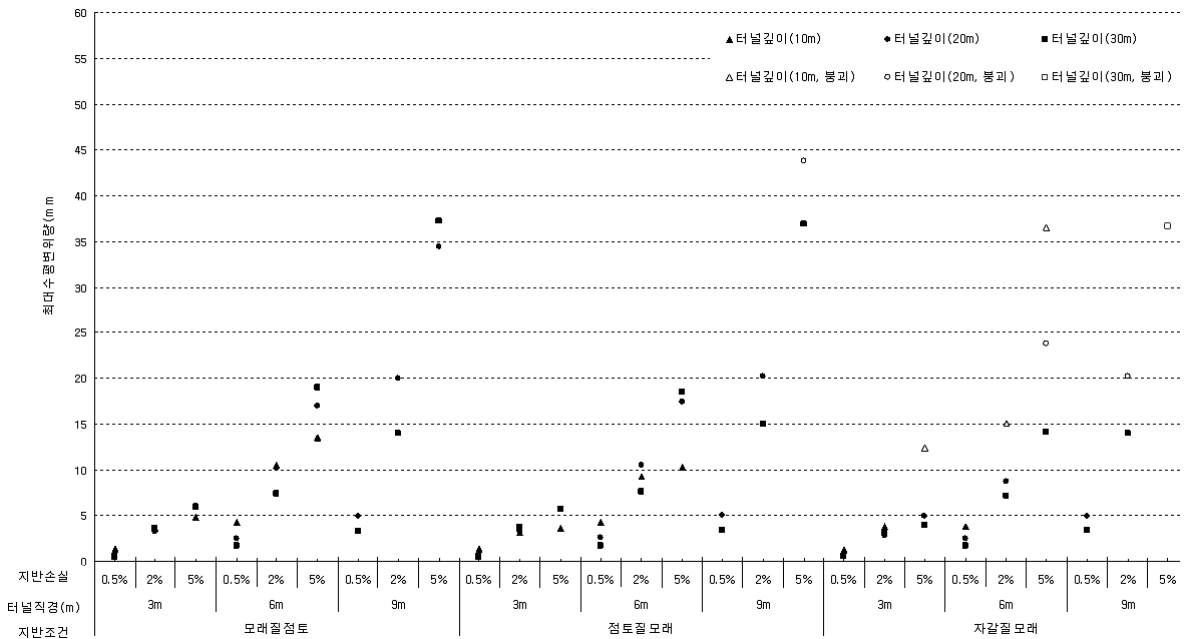


그림 13. 지반조건, 터널직경 및 깊이, 지반손실량에 따른 지표면 최대 수평변위량 비교

4.2 최대 수평변위량

그림 13은 해석이 수행된 모든 경우들에 대해 지표면에서 발생한 최대 수평변위를 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 비교를 한 것이다. 발생한 최대 수평변위에 대한 조건별 경향은 지표면에서의 최대 침하의 경향과 유사한 특징을 나타내었다. 다시 말해서, 지반손실량이 작고 터널직경이 작을수록 발생한 지표면에서의 최대 수평변위는 터널깊이에 크게 영향을 받지 않았으나, 지반손실량 및 터널직경이 증가할수록 지표면에서 발생한 수평변위는 터널깊이에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 자갈질 모래에서 가장 뚜렷하게 나타났고 모래질 점토에 가장 약하게 나타났다. 이와 같이 지표면에 발생하는 최대 수평변위는 지반조건, 터널깊이 및 직경, 시공조건(지반손실량)에 따라 서로 다르게 발생한다는 것을 상기 조사로부터 알 수 있었다.

그림 14는 붕괴가 발생한 경우를 제외한 모든 경우에 대해 조사된 지표면에서 발생한 최대 침하와 최대 수평변위의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 침하 및 최대 수평변위의 관계는 지반조건, 터널직

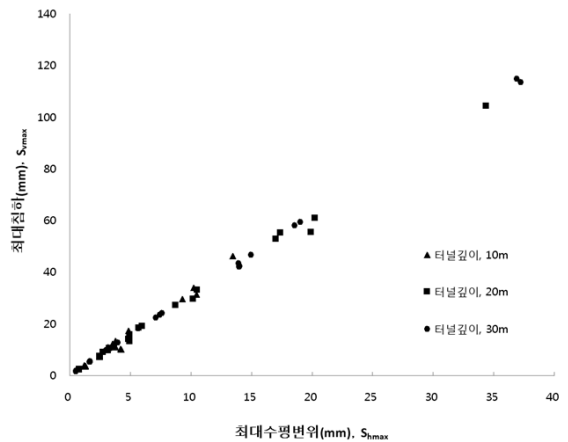


그림 14. 최대 침하 및 최대 수평변위의 관계

경 및 깊이, 시공조건에 관계없이 일관성을 가지고 거의 선형관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 상기 그림으로부터 최대 수평변위는 최대 침하의 약 35% 정도가 된다는 것을 알 수 있으며, 이는 여러 선형연구자(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 유발 주변지반의 최대 수평변위를 최대 침하로부터 예측함에 있어서 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 해석이 수행된 경우에 있어서 최대 수평변위가 발생하는 변곡점(i)의 위치와 침하곡선의 중심을 기준으로 한쪽방향의 폭과의 관계를 조사한 결과, 터널붕괴가 발생한 경우를 제외하곤 침하곡선의 한쪽방향의 폭이 변곡점(i)까지 거리의 2.5~3.0 배에 있는 것으로 나타났다.

4.3 터널굴착부의 지반손실량(V_L) 및 지표면에서 발생된 침하부피량(V_S) 비교

그림 15-17은 붕괴가 발생한 경우를 제외한 모든 경우에 대해 조사된 터널굴착부의 지반손실량과 지표면에서 발생된 침하부피량(지표면 침하프로파일의 면적 \times 단위 길이)을 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 비교를 한 것이다.

그림 15는 모래질 점토에 대한 관계를 나타낸 것으로서 터널깊이가 깊고 터널직경이 작을수록 지표면에서의 침하부피량이 굴착면의 지반손실량에 비해서 크게 발생하는 경향을 나타내고 있다. 지반손실량이 작은 경우들

에 있어서는 지반손실량과 지표면 침하부피량이 상대적으로 큰 차이가 없었지만 지반손실량이 증가할수록 그 차이는 점점 더 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 지반손실량이 작은 경우들에 있어서는 터널 깊이 및 직경에 대해서도 큰 차이를 나타내지 않았지만 지반손실량이 증가할수록 터널깊이 및 직경의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상을 분석해보면 지반손실량이 작은 경우에는 지반이 전반적으로 탄성적 거동을 나타내어 터널굴착면에서의 지반손실량과 지표면에서의 침하부피량이 큰 차이를 나타내지 않았기 때문이며, 굴착면에서의 지반손실량이 크고 터널깊이가 깊고 직경이 작은 경우에는 지반이 탄성적 거동을 나타내지 않을 뿐만 아니라 터널상부의 지반이 상대적으로 많이 압축되어 지표면에서의 침하부피량은 굴착면에서의 지반손실량보다 훨씬 크게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 터널이 얇고 지반이 조밀한 모래나 팽창성 지반을 통해 터널이 굴착되면 터널상부의 지반에서는 전단에 의한 부피팽창 현상 등이 발생하여 부피가 증가하고 지표면에서의 침하부피량은 터널굴착면에서의 지반손실량보다 작게 발생하는 경향이 있는 반면, 터널이 깊고 지반이 느슨한 모래나 압축성 지반을 통해 터널이 굴착되면 터널상부의 지반에서는 전단에 의한 압축현상 등이 발생하여 부피가 감소하고 지표면에서의 침하부피량은 터널굴착면에서의 지반손실량보다 크게 발생하는 경향이 있다. 본 연구를 통해 얻어진 또 하나의 결과는 같은 터널깊이 및 직경을 가지더라도 지반손실량에 따라 지반손실량 및 침하부피량의 관계가 매우 다르게 나타난다는 것을 알 수 있었으며, 특히 지반손실량이 큰 경우에 터널깊이가 얇고 터널직경이 증가되면 오히려 지표면에서의 침하부피량이 지반손실량보다 더 작게 발생할 수도 있다는 것을 터널깊이 10 m의 직경 3 m를 가진 터널의 경우로부터 알 수 있었다.

그림 16은 점토질 모래에 대한 지반손실량 및 침하부피량의 관계를 나타낸 것으로서 모래질 점토와 마찬가지로 터널깊이가 깊고 터널직경이 작을수록 지표면에서의 침하부피량이 굴착면의 지반손실량에 비해서 크게 발생하는 경향을 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 지반손실량이 작은 경우들에 있어서는 지반손실량과 지표면 침하부피량이 상대적으로 큰 차이가 없었지만 지반손실량이 증가할수록 그 차이는 점점 더 증가하는 것으로 나타

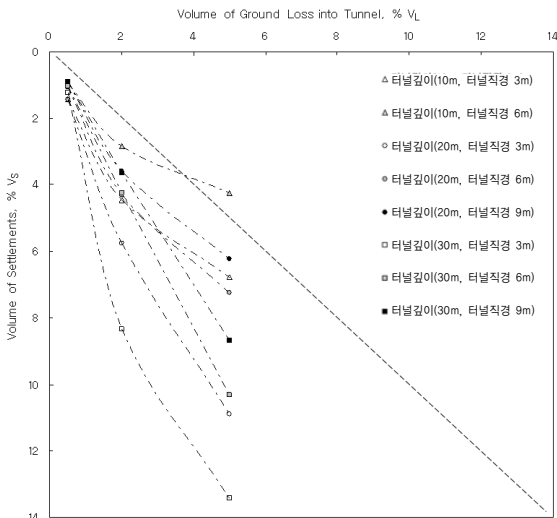


그림 15. 터널굴착면에서의 지반손실량과 지표면의 침하부피량의 비교(모래질점토)

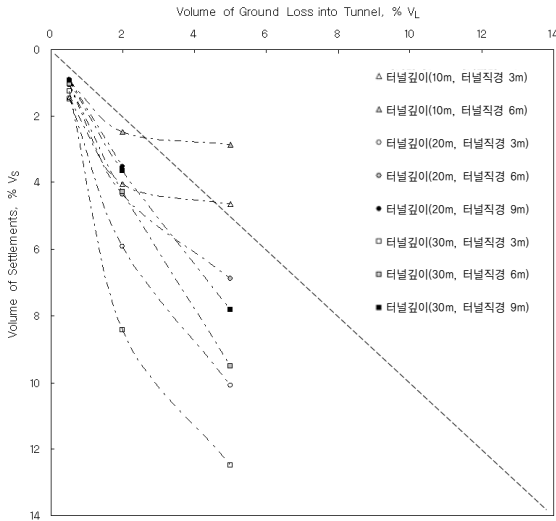


그림 16. 터널굴착면에서의 지반손실량과 지표면의 침하부피량의 비교(점토질모래)

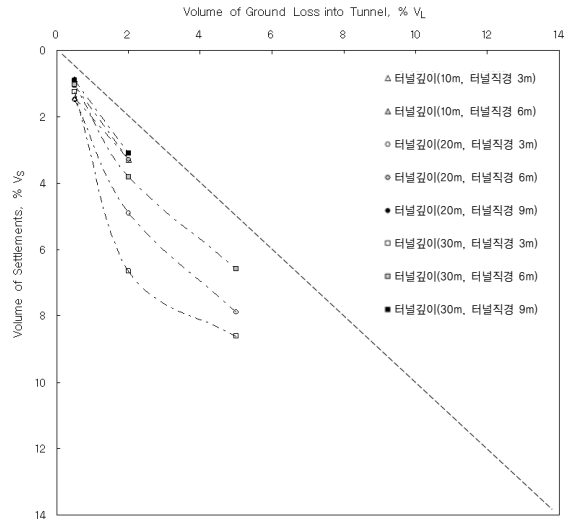


그림 17. 터널굴착면에서의 지반손실량과 지표면의 침하부피량의 비교(자갈질모래)

났다. 또한, 지반손실량이 작은 경우들에 있어서는 터널 깊이 및 직경에 대해서도 큰 차이를 나타내지 않았지만 지반손실량이 증가할수록 터널깊이 및 직경의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 모래질 점토에서와 비교해 지반손실량이 0.5%인 경우에는 지반손실량과 침하부피량의 관계에 있어서 큰 차이가 없었지만 지반손실량이 점점 증가할 수록 점토질 모래가 모래질 점토보다 전반적으로 침하부피량이 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 이러한 경향은 터널깊이가 보다 얇고 터널직경이 보다 큰 경우들에 있어서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 경향은 다시 말해서, 터널상부의 지반에서의 지반압축이 상대적으로 작게 발생하였다는 것을 의미하며, 이는 점토질 모래가 모래질 점토보다 변형계수가 상대적으로 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 터널깊이가 10 m로 얇은 경우에 있어서는 지반손실량이 5%인 경우에 침하부피량이 지반손실량보다 더 작게 발생하였다.

그림 17은 자갈질 모래에 대한 지반손실량 및 침하부피량의 관계를 나타낸 것으로서 모래질 점토 및 점토질 모래와 마찬가지로 터널깊이가 깊고 터널직경이 작을수록 지표면에서의 침하부피량이 굴착면의 지반손실량에 비해서 크게 발생하는 경향을 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 지반손실량이 작은 경우들에 있어서는 지반손실량과 지표면 침하부피량이 상대적으로 큰 차이가 없었지

만 지반손실량이 증가할수록 그 차이는 점점 더 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 지반손실량이 작은 경우들에 있어서는 터널깊이 및 직경에 대해서도 큰 차이를 나타내지 않았지만 지반손실량이 증가할수록 터널깊이 및 직경의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 모래질 점토 및 점토질 모래의 경우와 비교해 지반손실량이 0.5%인 경우에는 지반손실량과 침하부피량의 관계에 있어서 큰 차이가 없었지만 지반손실량이 점점 증가할 수록 모래질 점토나 점토질 모래보다 침하부피량이 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 다시 말해서, 터널상부의 지반에서의 지반압축이 다른 두 지반에 비해서 상대적으로 작게 발생하였다는 것을 의미하며, 이는 자갈질 모래가 모래질 점토나 점토질 모래보다 변형계수가 상대적으로 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 특히 터널 깊이가 10 m로 얇은 경우에 지반손실량이 5%인 경우 터널직경에 관계없이 터널붕괴가 발생하였으며, 터널 깊이가 20 m인 경우에 직경 6 m 및 9 m를 가진 터널은 지반손실량이 2%인 경우에도 붕괴가 발생하였다.

5. 결 론

터널굴착으로 인한 지표면에서의 최대 침하 및 최대 수평변위, 전체 침하부피량의 산정 및 파악을 위하여 지반

조건, 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. 지표면에서의 최대 침하와 터널천단부에서의 최대 침하 비(s_{max}/s_c)를 터널깊이와 직경의 비(Z/D)를 기준으로 서로 비교한 결과, 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 작은 경우에는 지반조건이나 터널깊이에 따라 큰 차이를 나타내지 않았으나, 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 지반손실이 발생한 현장계측자료를 서로 비교한 결과, 수치해석결과가 현장계측결과의 범위내에서 일관성있게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 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 최대 침하의 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 유발 주변지반의 최대 수평변위를 최대 침하로부터 예측함에 있어서

유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 터널굴착부의 지반손실량(V_L)과 지표면에서 발생한 침하부피량(V_s)을 지반조건, 터널직경 및 깊이, 시공조건(지반손실량)별로 비교한 결과, 터널깊이가 깊고 터널직경이 작을수록 지표면에서의 침하부피량이 굴착면의 지반손실량에 비해서 크게 발생하는 경향을 나타내었다. 뿐만 아니라, 지반손실량이 작은 경우 지반손실량과 지표면 침하부피량이 상대적으로 큰 차이가 없었지만 지반손실량이 증가할수록 그 차이는 점점 더 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 지반손실량이 작은 경우 터널깊이 및 직경에 대해서도 큰 차이를 나타내지 않았지만 지반손실량이 증가할수록 터널깊이 및 직경의 영향이 뚜렷하게 나타났다.
5. 터널굴착부의 지반손실량이 증가할수록 지표면에서의 침하부피량은 터널상부의 지반이 보다 큰 변형계수를 가진 지반일수록 보다 작은 크기의 침하부피량이 발생하였다. 이와 같은 결과를 통해 지반손실량 및 침하부피량의 관계는 지반손실량, 터널깊이 및 직경, 지반조건 모두에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고, 이러한 점을 고려할 때 향후 다양한 조건에서의 지표면에서의 침하부피량을 산정할 때 본 연구에서 수행된 결과가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 학술진흥재단 신진교수연구지원 사업에 의한 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00602). 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식, 김주미, 김선빈 (2006), “굴착공법이 터널변위 거동에 미치는 영향-수치해석 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 289-305.
2. Addenbrooke, T. I., Potts, D. M., and Puzrin, A. M. (1997), “The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction”, Geotechnique, Vol. 47, No. 3, pp. 693-712.
3. Attewell, P. B. (1978), Ground movements caused by

- tunnelling in soil, Proc. Conf. Large Ground Movements and Structures, Cardiff, Pentech Press, pp. 812-948.
4. 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.
 5. 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.
 6. Clough, G. W. and Schmidt, B. (1981), Design and performance of excavations and tunnels in soft clay, *Soft Clay Engineering*, Elsevier, NY, pp. 569-634.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Cording, E. J. (1991), Control of ground movements around tunnels in soil, Ninth Pan American Conference, Vina del Mar, Chile. *Sociedad Chilena de Geotechnica*, Vol. 4, pp. 2195-2244.
 10. Dasari, G. R. (1996), Modelling the variation of soil stiffness during sequential construction, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, UK.
 11. Dasari, G. R., Rawlings, C. G., and Bolton, M. D. (1996), Numerical Modeling of a NATM tunnel construction in London Clay, Proc. of Int. Sym. on Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground (eds. Mari, R. J. and Taylor, R. N.), Balkema, London, pp. 491-496.
 12. Deane, A. P. and Bassett, R. H. (1995), The Heathrow Express Trial Tunnel, Proc. of Inst. of Civil Engineers, Vol. 113 (July), pp. 144-156.
 13. Ghaboussi, J., Ranken, R. E., and Karshenas, M. (1978), Analysis of subsidence over soft-ground tunnels, Proc. Int. Conf. on Evaluation and Prediction of Subsidence, Pensacola Beach, FL, pp. 182-196.
 14. Glossop, N. H. (1978), Soil deformation caused by soft ground tunneling, Ph.D. dissertation, University of Durham, UK.
 15. Gunn, M. J. (1993), The prediction of surface settlement profiles due to tunnelling, Proc. of Wroth Memorial Symposium held at St Catherine's College (eds, S. Houlby), Oxford, Thomas Telford, London, pp. 304-316.
 16. Hong, S. W. and Bae, G. J. (1995), Ground movements associated with subway tunneling in Korea, *Underground Construction in Soft Ground* (eds. K. Fujita and O. Kusakabe), Balkema, pp. 229-232.
 17. Hong, S. W. (1984), Ground movements around model tunnels in sand, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. USA.
 18. Lee, K. M. and Rowe, R. K. (1989), "Deformations caused by surface loading and tunneling: the role of elastic anisotropy", *Geotechnique*, Vol. 39(1), pp. 125-140.
 19. Lee, K. M. and Rowe, R. K. (1990), Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils: Part 1 - method of analysis, Part 2 - results, *Computer and Geotechnics*, Vol. 10, pp. 87-138.
 20. Leca, E. (1996), Modelling and prediction for bored tunnels, Proc. of Int. Sym. on Geotech. Aspects of Underground Construction on Soft Ground (eds. R. J. Mair and R. N. Taylor), Balkema, London, pp. 27-42.
 21. 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.
 22. Mair, R. J. (1979), Centrifugal Modeling of tunneling construction in soft clay, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, U.K.
 23. Mair, R. J., Phillips, R., Schofield, A. N., and Taylor, R. N. (1984), Application of centrifuge modelling to the design of tunnels and excavations in soft clay, Proc. of symposium on the application of centrifuge modelling to geotechnical design, Manchester, April, Balkema, pp. 357-380.
 24. Martos, F. (1958), Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors, In International strata control congress, Leipzig, pp. 191-205.
 25. Moeller, S. C. and Vermeer, P. A. (2008), On numerical simulation of tunnel installation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 461-475.
 26. 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.
 27. Panet, M. and Guenot, A. (1982), Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Proc. *Tunnelling 82*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 197-204.
 28. Potts, D. M. (1976), Behavior of lined and unlined tunnels in sand, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, U.K.

-
29. 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.
30. Sagaseta, C. (1987), "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss", Geotechnique, Vol. 37(3), pp. 301-320.
31. Stallebrass, S. E., Jovicic, V., and Taylor, R. N. (1994), The influence of recent stress history on ground movements around tunnels, Prefailure Deformation of Geomaterials (eds, Shibuya, S., Mitachi, T., and Miura, S), Balkema, London, pp. 612-620.
32. Verruijt, A. and Booker, J. R. (1996), "Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane", Geotechnique, Vol. 46(4), London, U.K., pp. 753-756.

접수일(2009.6.5), 수정일(1차: 2009.6.27, 2차: 2009.7.8), 게재확정일(2009.7.10)