실내모형시험을 통한 점성토 지반의 토피고에 따른 지표침하 특성연구

김영준¹ · 임채근² · 강세구³ · 이용주^{4*}

¹정회원, (주)태조엔지니어링 상무

²정회원, (주)한라 차장

³정회원, 대경컨설턴트 대표이사

⁴정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수

A study on surface settlement characteristics according to the cohesive soil depth through laboratory model tests

Young-Joon Kim¹, Che-Geun Im², Se-Gu Kang³, Yong-Joo Lee^{4*}

¹TESO Engineering Co., Ltd. Executive Director

²Halla Corporation Deputy General Manager

³Daekyoung Consultant Co., Ltd. CEO

⁴Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Professor

ABSTRACT: In this study, the surface displacement was investigated according to the various depth of cover when the tunnel excavation equipment was used in a clay soil. For this the laboratory scaled model test was carried out using the soil sample similar to the in-situ conditions. We carried out four tests according to tunnel depth(1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D). The distribution of impact due to tunnelling was quantitatively analyzed in the three-dimension by measuring the surface displacement. In addition, the pattern of surface displacements was figured out.

Keywords: Laboratory scaled model test, Cohesive soil, Depth of cover, Excavation machine

초 록: 본 연구는 점성토 지반에서 터널 굴착장비를 이용하여 터널을 굴착할 때 토피고 변화에 따라 발생하는 지표변위 특성을 고찰하였다. 이를 위하여 현장조건과 유사한 시료를 이용하여 실내축소모형시험을 수행하였다. 토피고에 따라 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D의 총 4개의 Case 에 대하여 모형시험을 수행하였다. 이러한 모형시험을 통하여 터널굴착 시 발생하는 지표변위를 측정하여 3차원적 영향분포를 정량적으로 분석하였으며, 더불어 변위양상도 규명하였다.

주요어: 실내축소모형시험, 점성토 지반, 토피고, 굴착장비

1. 서 론

최근 도시화와 인구집중에 의하여 지하공간의 이용 및 수요는 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 도심지에서 도로, 지하철, 상하수도, 가스관 등을 매설하기 위하여 얇은 심도의 터널이 빈번히 계획, 시공되고

있다. 일반적으로 얇은 터널은 주로 지반조건이 토사나 암반조건이 불량한 경우가 대부분이며, 산악터널이나 심도가 깊은 곳에 계획되어 지반아치가 형성되는 일반적인 깊은 터널과는 거동이 상이한 것으로 알려져 있다. 현재까지 일반적으로 사용되고 있는 터널굴착으로 인한 지표면 변위에 관한 예측은 경험적인 예측방법 또는 수치해석에 의존한 예측방법이 적용되고 있다.

터널굴착으로 인한 지표면의 변위를 예측하는 방법은 현재까지 다음과 같이 여러 가지 방안이 제안되어

*Corresponding author: Yong-Joo Lee

E-mail: ucesyjl@seoultech.ac.kr

Received September 18, 2014; Revised September 29, 2014;

Accepted October 2, 2014

있다. Ghaboussi et al (1978)은 탄성 및 탄소성 2차원 유한요소해석을 실시하고 모형 시험결과와의 비교 분석을 실시하였다. Lee and Rowe (1990)은 3차원 터널해석에 적합한 탄소성 모델을 제안하였으며, Peck (1969)은 지표면의 변위를 예측할 수 있는 경험식을 제안하였으며, 지반의 변형은 터널굴착중 비배수 조건에서 터널의 굴착으로 인하여 발생한다고 하였다. Schmidt (1969) and Peck (1969)은 터널 상부면에서 발생하는 지표침하의 형태는 가우스분포와 정규분포 곡선과 유사한 형태를 보인다고 제안하였다.

국내·외 문헌조사를 통하여 터널굴착으로 인한 지표면의 변위 특성에 관한 연구경향을 고찰한 결과, 터널굴착으로 인한 지표변위에 대한 수치해석적, 이론적인 연구 사례는 다수 있었으나, 토피고를 변화시켜가며 수행한 모형시험을 통하여 터널굴착 영향에 대한 지표면의 변위를 정량화한 연구사례는 거의 드문 편이다(Lee and Ryu, 2010). 본 연구에서는 점성토 지반에서 터널굴착장비를 이용하여 터널을 굴착할 때 토피고 변화에 따른 지표변위 등을 고찰하고, 터널 굴착 시 터널주변에 발생하는 지표변위를 측정하여 3차원적으로 발생하는 영향분포를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. 얇은 터널의 거동

2.1 얇은 터널과 깊은 터널의 파괴모드

깊은 터널과 얇은 터널의 파괴모드와 분류에 대해

서는 Pantet (1991)가 두 가지 파괴모드에 대하여 제안하였으며, 깊은터널의 경우($C/D \gg 2.5$)에는 터널굴착 상부로는 터널직경의 1-1.5 배, 폭 방향으로는 터널 크기 정도로 느슨해져서 발생하고 터널굴착으로 인한 지표면의 영향이 거의 발생하지 않는다(Fig. 1).

두 번째 파괴형태는 Fig. 2와 같이 터널이 지표면에 가까이 있는 경우($C/D < 2.5$)에 터널에 설치한 지보가 작용하중에 비하여 부족한 경우에 발생하며 전단면이 터널로 부터 지표면까지 연장된다.

2.2 얇은 터널의 굴착에 의한 지표침하

터널 굴착시 상부 지반의 과도한 침하에 의해 침하 영향권내 구조물이 손상되지 않도록 사전에 터널 상부지반의 변형과 상부 구조물의 손상정도를 예측하여 터널을 설계해야 한다. 그러나 지반의 응력·변형률관계는 비선형적이기 때문에 지반의 변형을 예측하기가 어려워져 예측 정확도가 떨어진다. 얇은 터널이 있는 지반은 대개 불균질하고 비등방성이며, 하중크기(작용응력)가 비교적 작다.

터널굴착에 의한 주변지반 변위는 3 차원적으로 발생되어 연직침하와 수평변위가 동시에 일어나지만, 지반조건이 특이한 경우를 제외하면 터널의 연직 중심선을 지나는 터널 상부 지반의 변위는 연직침하형태로 발생한다.

터널 주변지반이 이완되면, 지반은 지지력이 상실되어 전단변형이 증가되고 소성영역이 확대된다. 또한, 유효응력 변화에 의해 주변지반이 압밀되거나 터

Fig. 1. Failure mode of the deep tunnel

Fig. 2. Failure mode of shallow tunnel

널내로 밀려들어와서 지반이 손실되면, 그 영향이 지표면까지 전달되어 지표가 침하 된다. 얇은 터널 상부 지반의 지표침하는 지반이 등체적 변형한다고 가정하고 Lamé의 탄성해를 적용하여 구하거나, 지표침하가 Gauss 분포나 포물선형이라고 가정하여 구한다.

얇은 터널굴착에 의한 지표침하는 3차원적으로 발생하며(Fig. 3), 터널 상부 수평지표면의 횡방향 지표침하는 지반손실의 영향이 미치는 구간 내에서 발생한다. 임의 지점의 지표침하는 터널 중심선상 침하량과 횡방향 거리별 침하형태로부터 구할 수 있다. 또한, 종방향 지반변위는 막장 위치와 굴진장 및 터널 중심선상의 최대 침하량으로 부터 예측할 수 있다.

2.3 종방향 지표침하

터널굴착에 의한 지표침하는 터널 중심선상 종방향 지표침하와 3 차원 변위 형상으로부터 예측한다. 터널 상부에 발생하는 종방향 지표침하는 오차함수(error function)나 누적 가우스 정규분포함수(cumulative Gaussian normal distribution function)로 해석할 수

있다(Attewell, 1977). 3차원 종방향 지표침하 u_v 는 다음 식 (1)과 같다.

$$u_v = u_{v \max} \exp \left[\frac{-y^2}{2a_i^2} \right] \left\{ G \left(\frac{x-x_l}{a_{ix}} \right) - G \left(\frac{x-x_f}{a_{ix}} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } G(a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{a_i}^{-a_i} \exp \left(\frac{-u^2}{2} \right) du$$

x : 막장으로 부터 터널 굴진방향 거리

x_l : 터널 굴착 시점의 위치

x_f : 터널 막장의 위치

y : 터널 중심선으로부터 관심 지점의 횡방향 거리

a_{ix} : 터널 굴진방향(x 방향) 최대경사 위치

$$(a_{ix} \doteq a_i)$$

$u_{v \max}$: 최대지표 침하량

2.4 횡방향 지표침하

얇은 터널 상부지반의 지표침하는 지반이 균질한

Fig. 3. Ground displacement of shallow tunnel excavation

탄성체이고 등체적 변형한다고 가정하고, Lamé의 탄성해를 적용하여 계산하거나 Gauss 분포로 가정하여 계산한다.

2.4.1 Lamé의 탄성해

터널상부 지표면의 침하 즉, 연직변위 u_v 는 횡방향으로는 터널 중심축상에서 가장 크고 좌우 대칭으로 일정한 폭 a_i 로 발생하고, 종방향으로는 막장을 중심으로 전후방 같은 범위 $2.5a_i$ 내에서 발생한다고 가정한다. 지표의 연직변위 u_v 는 다음과 같고, 이로 부터 수평변위 u_h 를 구할 수 있다.

$$u_v = uH/r, \quad u_h = u_v x/H \quad (2)$$

터널상부 지표위에 있는 임의 지점(x, H)의 연직 지표침하 u_v 는 무게가 없는 탄성체에 있는 터널이 평면변형률상태(원통)이고 등방압 σ_{v0} 이 작용한다고 가정하고 Lamé의 해를 적용하여 구할 수 있다.

터널굴착으로 인해 굴착면 압력이 초기응력 σ_{v0} 에서 지보압 p_i 로 감소할 때에 연직지표변위 u_v 는 다음과 같다($r^2 = H^2 + x^2$).

$$u_v = \frac{\sigma_{v0} - p_i}{2G} \frac{r_o^2}{r} = \frac{\sigma_{v0} - p_i}{2G} \frac{r_o^2}{\sqrt{H^2 + x^2}} \quad (3)$$

2.4.2 Gauss 분포 지표침하

터널굴착 직후에 터널 상부 수평단면에 발생하는 횡방향 지표침하 트라프의 형태는 지반조건에 상관없이 Gauss 정규 확률 분포함수로 표현할 수 있다. 터널굴착에 의한 지표침하 u_v 는 Gauss 정규 확률분포함수로 해석하면 Lamé의 탄성해보다 실제로 더 가까운 해를 구할 수 있다(Peck, 1969). 가우스곡선은 연약지반 터널에도 적용할 수 있고, 곡선식이 비교적 간단하여 현장지반의 침하해석에 사용하기가 편하지만, 지표침하의 일반적인 형태만을 표현할 수 있기 때문에 현장특성에 따라 가우스 곡선과 실제 침하 트라프 사이에는 편차가 생길 수 있다. Fig. 4는 터널 굴착을 완료한 상태(침하가 완전히 수렴된 후)에 임의 수평단면에 발생하는 횡방향 침하 u_v 를 다음 Gauss 정규 분포곡선으로 도시한 것이다.

$$u_v = u_{v \max} \exp \frac{-y^2}{2a_i^2} \quad (4)$$

여기서, u_v 는 터널 중심선에서 수평거리 y 만큼 떨어진 지표의 침하량이고, $u_{v \max}$ 는 최대 지표 침하량(터널 중심선의 지표침하량)이며, 침하 트라프의 폭 a_i 는 터널 중심선에서 변곡점(inflexion point)까지 수평거리이다.

Fig. 4. Settlement profiles based on normal probability curve(Peck, 1969)

3. 모형지반의 특성시험

3.1 모형지반 조성

모형 지반은 현장에서 채취한 퇴적점성토를 사용하였으며, 시험에 사용한 퇴적점성토는 함수비 측정결과 약 25~30% 내외의 값을 보였다. 다짐시험 및 터널굴착시험을 예시로 수행하여 다짐도 관리 및 시험이 가능한 함수비인 25% 전후의 함수비를 유지하도록 관리하면서 모형시험에 사용하였다.

퇴적점성토지반의 다짐은 높이가 약 10 cm 이하가 되도록 흙을 투입하고, 일정한 다짐에너지로 다짐을 수행하였다. 본 모형시험에서 터널굴착 후 여러 지점에서 단위중량과 함수비를 측정하여 일정한 다짐 및 함수비가 유지되었는지 확인하였다.

3.2 모형지반의 물리적 특성

모형시험에 사용한 지반은 입도분포시험, 아터버그 한계시험, 비중시험 등의 기본물성 시험결과 중소성CL(점토)에 해당하였다. 또한 역학적 특성조사를 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 모형지반의 습윤단위중량(γ_t)은 15.17 kN/m^3 , 함수비(w)는 25%로 나타났다. 액성한계(w_L)는 35.20%, 소성한계(w_P)는 20.93%로 Fig 5과 같은 결과를 보이고 있으며, 모형지반의 비중(G_s)은 2.58이다.

Fig. 5. Result of liquid limit test

3.3 모형지반의 역학적 성질

모형시험 지반의 전단강도를 구하기 위하여 현장에서 채취한 시료로 모형지반을 조성한 후 모형토조 내부지반에 대하여 직접전단시험, 베인시험, 콘관입시험을 실시하여 Figs. 6, 7, 8와 같은 시험결과를 얻었으며, 내부마찰각(ϕ)은 23° , 점착력(c)은 35.07 kPa 의 결과를 얻었다.

Fig. 6. Result of direct shear test

Fig. 7. Result of vane test

Fig. 8. Result of cone penetration test

3.4 모형시험체 크기 결정을 위한 차원해석

모형시험의 규모를 실제 현장조건과 유사한 크기로 시험할수록 치수효과에 의한 영향이 적어지며, 시험 결과를 바로 이용할 수 있으나 이를 위해서는 많은 인력과 자원이 필요하기 때문에 시험실에서 시험이 가능한 규모의 크기로 시험을 진행한 후 치수효과를 고려하여 실제와 유사한 결론을 도출하고자 하였다.

원지반의 변형거동을 연구하기 위하여 축소모형시험을 실시할 때 현장 조건이 충분히 구현될 수 있도록 하기 위해서 적절한 축소율을 결정하는 것이 중요하다. 세 가지 기본 차원을 길이[L], 질량[M], 시간[T]이라고 할 때 축소율을 산정하는 순서는 우선 길이에 대한 축소율을 결정한 후 이를 이용하여 시간, 밀도, 질량, 응력, 강도 등의 축소율을 차례로 산정하게 된다 (Hobbs, 1969). 길이에 대한 축소율은 모형시험체의 최대크기 및 터널모형(지름 20 cm)과 실제 터널의 크기(환산직경 620 cm)를 고려하여 길이[L]의 축소율을 1/30으로 결정하였다. 다음으로 시간[T]에 대한 축소율을 결정하는데, 여기에는 중력가속도 일정개념이 사용된다. 즉 중력가속도[LT⁻²]는 현장과 실험실에서 모두 같으므로 식 (5)에 의하여 시간[T]의 축소율은 1/5.477이 된다.

$$\frac{L}{T^2} = 1 \quad (5)$$

4. 실내모형시험

4.1 개요

터널 굴착 시 상부지반의 과도한 침하에 의해 침하 영향권 내 구조물이 손상되지 않도록 사전에 터널 상부지반의 변형과 상부 구조물의 손상정도를 예측하여 터널을 설계하여야 한다. 그러나 지반의 응력 변형률 관계는 비선형적이기 때문에 지반의 변형을 예측하기가 어려워서 예측 정확도가 떨어지게 된다.

터널굴착에 의한 주변지반 변위는 횡방향과 터널방향에 동시에 발생되어 3차원적으로 발생된다. 즉, 연직변위와 수평변위가 동시에 발생하며, 특이한 지반조건을 제외하면 터널의 연직중심선을 지나는 터널상부 지반의 변위는 연직침하형태로 발생한다. 본 연구에서는 점성토로 구성된 연약한 지반에서 원형의 모형 굴착기로 터널굴착시 상부지표면에서 발생하는 지표면의 변위를 토피고에 따라 분석하여 터널굴진 위치에 따라 지표면의 변위를 3차원적으로 분석하였다.

모형시험의 규모를 실제 현장조건과 동일한 크기로 시험 할수록 치수효과에 의한 영향이 적고 시험 결과를 바로 이용할 수 있으나 실험실에서 실험이 가능한 규모의 크기로 시험을 진행한 후 치수효과를 고려하여 실제와 유사한 결론을 도출하고자 하였다. 터널굴착은 직경 20 cm(터널직경 D)로 선정하여 모형토조의 측벽으로 3.25D이상, 하부로는 2.0D 이격시켜 측벽경계의 영향이 최소화 되도록 선정하였으며, 시험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Case of model test

Case	Overburden (H)
1	1.5D
2	2.0D
3	2.5D
4	3.0D

4.2 모형시험 장치

터널굴착을 위한 모형터널 굴착기는 전면판이 일정한 속도로 회전하면서 전진이 가능하고 굴착과 동시에 배토가 가능한 구조로 제작되었다. 또한 전면판 회전 시 편심이 발생하지 않고 직선으로 굴착이 가능하도록 다수의 롤베어링으로 구속하였다. 굴착 시 전면에 작용하는 막장압이 과도하게 발생하지 않으면서 회전 및 전진이 가능하도록 회전 및 굴진 속도를 측정하여 굴진 및 회전속도를 조정하여 시험 중 일정한 굴진속도와 막장압이 유지될 수 있도록 하였다.

굴착 모형시험기는 길이 3.24 m, 높이 1.15 m, 폭 0.66 m으로 1 m까지 굴진이 가능 하도록 Shaft의 길이를 조절하였으며, 3 tonf 용량의 Gear Box를 후방에 설치하였다(Fig. 9). 굴진을 용이하게 하기 위하여 별도의 Gear Box를 굴착시험기에 설치하여 Cutter Head를 회전시켰으며, 굴착시험기 후방과 Cutter Head의 후방에 각각 하중계(Load Cell)을 설치하여 굴착 시 토압을 측정하였다.

모형토조는 Fig. 10과 같이 길이 1.65 m, 높이 1.70 m, 폭 1.20 m 크기의 토조에 길이 1.5 m, 높이 1.2 m, 폭 1.0 m의 모형지반을 조성하였으며, 전면을 투명

아크릴 벽체(두께 $t=20$ mm)로 제작하여 굴착시 전면을 통하여 지반 거동 및 지표 변형 등을 관찰할 수 있도록 하였다. 토조 전면은 지반 조성 및 굴착시 변형이 일어나지 않도록 강성 평철을 횡방향으로 보강하여 구속하였으며, 측면 및 후면의 벽체는 5 mm의 철판에 100 mm 크기의 ㄷ형강을 7층 간격으로 보강하여 실험 시에 토조 자체의 변형이 일어나지 않도록 충분한 강성을 갖도록 하였다. 또한 토조 벽면측으로 임의의 누수가 발생되지 않도록 에폭시 코팅을 수행하였다.

모형토조의 양측면 경계조건은 벽마찰의 영향을

Fig. 9. Model testing machine

Fig. 10. Model test setup

Fig. 11. Boundary condition

감소시키기 위하여 철근 Mesh를 부착하여 토조벽면에 실험토사가 부착되어 흙과 흙의 마찰조건을 구현하였다. 철근 Mesh는 D25, D16 철근을 이용하여 횡방향 100 mm 종방향 75 mm로 격자모양으로 구성하여 양측면에 부착한 후 성토하여 모형지반 조성 시 철근 사이로 흙이 밀려들어가도록 하였다(Fig. 11).

4.3 축소모형시험

터널 토파고에 따른 지표면위 거동양상을 파악하기 위하여 다음과 같은 순서로 실험을 수행하였다. 먼저 제작된 모형토조에 지반을 조성하고 지표면에 변위를 계측할 수 있는 계측기를 설치하였다. 터널 굴착을 위한 모형 굴착기를 거치한 후 위치조정을 수행하고

최종적으로 굴착과 계측을 수행하였다.

터널 굴착을 위하여 전면판에 압력이 일정하게 작용하도록 후방의 Gear box의 속도를 사전 예비실험을 통하여 조절하였다. Gear box의 속도를 너무 빠르게 가할 경우 막장면에 너무 큰 하중이 작용하여 전면지반에 큰 압력이 작용할 수 있으므로 2 mm/min의 속도로 굴착 시험기를 압입하였으며, 막장면 굴진을 용이하게 하기 위하여 Cutter Head의 회전속도는 22 RPM을 유지하였다. Fig. 12는 터널굴착과 굴착이 완료된 후 터널상태이다.

4.4 모니터링

터널굴착 시 상부지표면에서 횡방향 및 종방향의

Fig. 12. Tunnel excavation

지표면의 변위를 측정하기 위하여 Fig. 13과 같이 29개의 변위계를 설치하였으며, 터널의 토피고 변화에 따라 터널 천단의 지표변위를 측정하기 위하여 계측위치를 변경하여 측정을 실시하였으며, 모형 굴착기에 작용하는 힘을 측정하기 위하여 하중계를 설치하였다.

시험준비가 완료된 후 전면벽을 제거하기 전에 모든 계측기를 준비한 후 계측을 하면서 전면벽을 제거하였다. 실험 도중 및 실험종료 후 약 30분간 데이터를

약 1분 간격으로 저장하였다. 실험단계에 따라 발생한 데이터는 TDS-303과 50개의 채널을 추가할 수 있는 확장 스캐너 switching box 1대를 사용하여 측정값을 저장하였다. 계측기의 제원과 수량은 Table 2와 같으며, Fig. 14는 계측기와 계측장비이다. 계측 장치는 정확도 확인을 위하여 실험 전에 Calibration을 실시하였으며 측정된 Data는 Tokyo Ssoki사의 TDS-303 Data logger로 저장하였다.

Fig. 13. Overview of the measurement position

(a) LVDT

(b) Load cell

(c) Data logger

Fig. 14. Measuring device

Table 2. Specifications of measuring device

Spec.	Load cell		LVDT		Data logger
Capacity	20 kN	5 kN	100 mm	50 mm	30 Channel
Sensitivity	0.5 N	0.5 N	0.01 mm	0.01 mm	-
Manufacturer	Tokyo Ssoki Japan	Bongshin Korea	Tokyo Ssoki Japan	Tokyo Ssoki Japan	Tokyo Ssoki Japan

5. 시험결과

5.1 횡방향 지반변위

점착력이 있는 토사지반에서 토피고를 1.5, 2.0, 2.5, 3.0D로 변경하면서 직경 20 cm의 모형 시험기를 이용하여 터널굴착 시 지표면에서 발생하는 지표면의 변위를 측정하고 다음과 같은 결과를 얻었다. Fig. 15~18와 같이 토피고에 따른 지반변위 측정결과, Case 1에서는 14.3 mm, Case 2에서는 11.2 mm, Case 3에서는 12.3 mm, Case 4에서는 15.1 mm가 발생하였으며, 토피고가 증가함에 따라 지반변위가 증가하는 결과를 보이고 있다. 이는 토피고가 증가함에 따라 터널에 작용하는 상재하중이 커진 것에 기인하는 것으로 판단된다. 다만, 토피고가 1.5D인 Case 1의 시험 결과는 다른 시험결과의 경향에 비하여 상당히 큰

변위가 발생하였는데, 이는 토피가 상대적으로 작아 굴착 시 지반이 안정성을 확보하지 못한 것으로 판단된다.

터널 상부의 토피고가 증가할수록 침하량 자체가 증가함은 물론 침하곡선의 기울기 또한 급해지는 경향을 관찰할 수 있었으며, 이러한 경향은 지표에 근접한 구조물과 지하매설물에도 구조적 문제점을 발생시킬 우려가 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 터널 35 cm 굴진 시 계측측점(0~10)에서 계측된 지표침하 결과이며, Fig. 16은 터널 65 cm 굴진 시 계측측점(11~14)에서, Fig. 17은 터널 95 cm 굴진 시 계측측점(15~25)에서 측정된 계측결과이다.

5.2 종방향 지반변위

종방향 지반변위에 대한 측정결과는 Fig. 18과 같이

Fig. 15. Ground settlements in the lateral direction (Tunnelling length: 35 cm)

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 16. Ground settlements in the lateral direction (Tunnelling length: 65 cm)

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 17. Ground settlements in the lateral direction (Tunnelling length: 95 cm)

Fig. 18. Ground settlements in the longitudinal direction

토피고가 증가함에 따라 지반변위가 증가함을 알 수 있다. 참고로 Fig. 18은 Fig. 13의 터널 중심축에 설치된 계측측점에서 측정된 지표침하 결과를 나타내고 있다.

5.3 각 CASE별 지반변위

Fig. 19는 각 시험조건 대하여 횡방향 지반변위를 측정 지점별로(측점 35 cm, 65 cm, 95 cm) 정리하여

도시하였다. Fig. 20은 발생한 지표변위를 S라 하고 토피고를 H라 할 때, S를 H로 나누어 무차원으로 나타내었다.

6. 결론 및 제언

본 연구는 연약지반 하부를 통과하는 터널의 실제 현장을 실내 모형시험에 모사하기 위해 터널굴착 모형시험기를 새로이 고안하였으며, 터널 토피고에 따

Fig. 19. Surface displacements in the lateral direction

Fig. 20. Surface displacements in the lateral direction(Non-dimensional)

른 굴착 시 지반의 거동을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 토피고에 따른 모형 터널굴착시험기를 이용한 시험에서 1.5D case에서 최대변위 14.3 mm, 2.0D case에서는 11.2 mm, 2.5D case에서는 12.3 mm, 3.0D case에서는 15.1 mm가 발생하였다. 이는 토피고 증가에 따라 터널에 작용하는 상재하중의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 다만, 저토피구간인 1.5D의 실험결과는 다른 실험결과의 경향에 비하여 다소 큰 변위가 발생하였는데, 이는 토피가 너무 작아 굴착시 지반이 안정성을 확보하지 못한 것으로 판단된다.
2. 시험결과에서 보듯이 터널 상부의 토피고가 증가할수록 침하량 자체가 증가함은 물론 침하곡선의 기울기 또한 급해지는 경향을 관찰할 수 있었으며, 이러한 경향은 지표에 근접한 구조물과 지하매설물에 구조적 문제점을 발생시킬 우려가 있음을 알 수 있다.
3. 시험결과, 토피가 작은 경우에는 터널직상부에서 변위가 크고 횡방향으로 이격할수록 변위가 급격하게 작아지는 반면(뽀족한 종모양), 토피가 깊어지면 터널직상부에서의 변위는 작아지고 영향범위는 좀 커지는 경향(완만한 곡선)을 나타내었다.
4. 주변지반이 압축변형 되어 발생하는 지반침하는 천천히 일어나지만, 터널 내공면의 변형에 의한

지반침하는 빠른 속도로 크게 발생되므로 이러한 구간을 굴착하는 경우 막장의 안정을 취하는 것이 터널 및 상부구조물의 안정성 확보를 위하여 중요할 것으로 판단된다.

5. 터널이 굴착되는 실제지반은 상당기간동안 지반 안정을 취한 상태인 반면 실험지반은 균질한 에너지로 다짐을 수행하기는 하였지만 실험직전 되메움(교란상태)을 한 것이므로 침하, 지하수 저하에 따른 변형거동이 실제지반 상태와 다소 상이할 수 있다.

본 연구에서는 현장지반과 유사한 지반의 시료를 사용하여 소규모의 모형시험을 수행하였지만, 시험에서 산출되는 변위 및 하중을 실제 현장에 직접적으로 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 다만, 시험한 모델에 대한 결과의 상호비교를 통하여 상호간의 정성적 비교를 통한 지반의 거동예측은 가능하다고 판단된다. 따라서 제시하는 시험 결과는 상호비교, 또는 정성적인 경향만을 나타내는 한계를 가지고 있음을 밝혀두고자 한다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Attewell, P.B. (1977), "Ground movements caused by tunnelling in soil", Proceeding of Conference on Large Ground Movements and Structures, Cardiff, England, pp. 812-948.
2. Hobbs, D.W. (1969), "Scale model study of strata movement around mine roadways. IV. roadway shape and size", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, pp. 305-404.
3. Ghaboussi, J., Ranken, R.E., Karshenas, M. (1978), "Analysis of subsidence over soft ground tunnels, evaluation and prediction of subsidence", ASCE, pp. 182-196.
4. Lee, K.M., Rowe, R.K. (1990), "Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling on soft cohesive soils : Part II - result", Computers and Geotechnics, 10, pp. 111-138.
5. Lee, Y.J., Ryu, C.Y. (2010), "Determination of K values from tunnel model tests in sandy ground", Tunnelling Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 87-94.
6. Pantet, A. (1991), "Creusement de galeries à Faible profondeur à l'aide d'un tunnelier à pression de boue: mesures in situ et étude théorique du champs de déplacements", These de doctorat, INSA, Lyon.
7. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground. state of the art report, proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering", Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290.
8. Schmidt, B. (1969), "Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil", Ph.D thesis, University of Illinois.