

터널모형실험을 통한 사질토 지반에서의 K값의 산정

이용주^{1*}, 류창열²

Determination of K values from tunnel model tests in sandy ground

Yong-Joo Lee, Chang-Youl Ryu

Abstract This study mainly focused on the subsurface settlement due to shallow and deep tunneling in sandy ground. In order to figure out theoretical deformation patterns in association with the ground loss during the progress of tunneling, laboratory model tests using aluminum rods and finite element analyses using the CRISP program were carried out. As a result of comparison between the model test and the finite element analysis, the similar deformation patterns were found. In addition, it was identified that the most K values obtained from both the FEA and the model tests were distributed between Dyer et al. (1996) and Moh et al. (1996) of the field observation data. Based on the model test data, the linear equation of K for the sandy soil could be obtained.

Keywords: Subsurface settlement, model tunnel tests, soft ground, finite element analysis, K values

요지 본 연구는 사질토 지반에서의 얇은 터널과 깊은 터널굴착으로 인해 발생하는 지중침하에 주안점을 두었다. 터널 굴착과정에서 일어나는 지반손실에 따른 이론적인 변형형태를 규명하기 위해 알루미늄 봉을 이용하는 실내모형실험과 CRISP 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 모형실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교·분석한 결과, 서로 유사한 변형형태를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 지중침하곡선의 폭에 대한 계수인 K값은 Dyer 등(1996)과 Moh 등(1996)의 현장측정 값 사이에 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 터널모형실험 결과를 토대로 사질토 지반에서의 선형적인 K방정식을 얻을 수 있었다.

주요어: 지중침하, 터널모형 실험, 연약지반, 유한요소해석, K값

1. 서론

도심지에서는 터널굴착으로 인해 종종 지표면에서 침하가 발생한다. 이러한 지표침하는 지반조건, 굴착속도, 지하수 조건, 지반보강 및 굴착방법 등에 따라 그 규모가 달라진다. 무엇보다 도심지에서는 이러한 지표침하로 인해 인접한 건물 및 기타 지중구조물에 손상을 최소화 하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 이러한 연약지반에서의 터널굴착은 지표면에 발생하는 침하, 인접구조물의 거동, 시공상황 등을 종합적으로 고려하여 진행하여야 한다.

지표면에서 발생하는 침하는 일반적으로 지반손실(V_L , %)의 형태로 나타낼 수 있으며, 지반조건 및 굴착방법, 터널형상 등에 따라 그 범위도 다양하게 분포한다 (Attewell 등, 1986, 손무락 등, 2009). 지반변형의 형태

와 규모는 흙의 종류, 터널시공으로 인한 응력이력, 터널 시공 방법, 지질학적 환경, 지하수 위치, 시공속도, 그리고 노무자의 숙련도에 따라 다르게 나타난다.

현재까지 진행된 대부분의 연구는 점성토 지반에서의 터널굴착에 따른 지반거동을 다루고 있기 때문에 사질토 지반에서의 지반거동에 대한 연구는 상대적으로 드문 편이다. 특히, 사질토 지반에서의 과다 굴착(큰 지반손실)으로 인한 지중변형에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구는 사질토 지반에서의 얇은 터널굴착과 깊은 터널굴착으로 인해 발생하는 지중침하형태에 대해 조사하였다. 이와 관련 이론적인 침하형태를 나타내기 위해 유한요소 프로그램인 CRISP을 사용하였고 터널모형실험에서 변위를 구하고자 근거리사진계측기법을 적용하였다. 한편, 사질토 지반을 모사하기 위해 지름이 다양한 알루미늄 봉을 사용하였다.

¹서울산업대학교, 건설공학부, 조교수

²서울산업대학교, 건설공학부, 학부연구생

*교신저자: 이용주 (E-mail: ucesyjl@snut.ac.kr)

2. 지중침하

일반적으로 터널굴착으로 인해 발생하는 지반거동의 모식도는 그림 1에서 보는 바와 같이 복잡한 3차원거동을 나타낸다. 굴진장(tunnel advance)에 따라 종방향(y 축) 및 횡방향(x축)에서 변위가 발생되어 최종적으로 지표면 침하 범위(extent of surface settlement trough)가 결정된다. 여기서, 횡방향에 대한 지표침하 범위를 변곡점(i)의 3배인3i로 규정하고 있으나(Attewell 등, 1986), 일반적으로 실무에서는 2.5i를 고려한다. 이러한 변곡점은 굴착조건, 지반손실, 지반조건 및 지하수 유무 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

그림 1에서의 지표침하곡선(surface settlement trough)

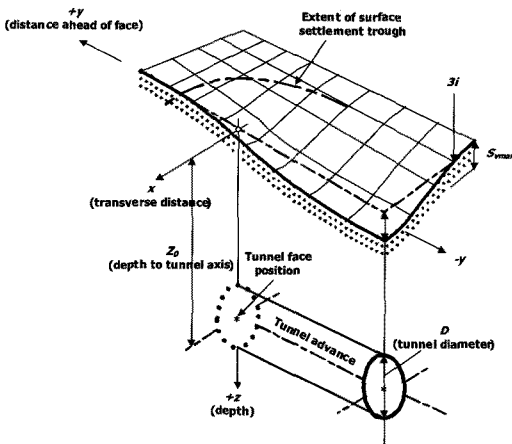


그림 1. 터널굴착으로 인한 3차원 지표침하 모식도

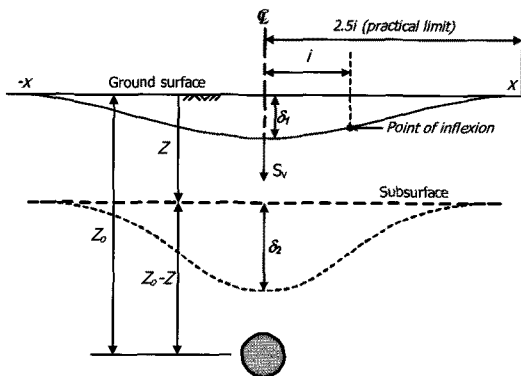


그림 2. 이론적 지표침하 및 지중침하 양상

은 항상 가우스 에러 함수 곡선(Gauss error function curve)으로 정확하게 예측되지 않는다. 특히, 사질토 지반에서 발생하는 비교적 큰 침하형태는 “관(funnel)” 또는 “굴뚝(chimney)” 과 같이 폭이 좁은 침하곡선으로 나타난다(Potts, 1976; Attewell, 1977; Cording, 1991). 그러나, 실제 설계에서는 침하곡선을 일반적으로 가우스 에러 함수 곡선으로 특징을 짓는다.

지표침하에 대한 측정값과는 대조적으로 지중침하에 대한 현장 측정값은 매우 드물다. 일반적으로 터널굴착으로 인한 지표면과 지중에서의 침하형태는 그림 2과 같이 가우스 분포로 나타낼 수 있다.

그러나, 점성토 지반에서 현장과 모형실험을 통해 얻은 지중침하 값으로부터 K(trough width parameter)값이 항상 일정하지 않고 깊이에 따라 증가한다는 사실이다. 또한 깊이에 비례하여 터널 상부에 접근할수록 폭이 넓은 침하형태를 나타낸다(Mair 등, 1993). 이러한 지중침하와 관련하여 Mair 등(1993)은 K값과 지표면 아래 무차원의 지중면(Z/Z0)와의 상관관계를 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$K = \frac{0.175 + 0.325(1 - Z/Z_0)}{1 - Z/Z_0} \quad (1)$$

여기서, K는 지중침하곡선의 폭을 나타내는 계수이며, Z는 지표면 아래 위치하는 지중침하곡선의 깊이를 나타낸다. Z0는 지표면 아래 터널의 중심축의 깊이를 나타낸다. 지하수 아래 실트질 모래지반에서 지중침하와 관련된 현장측정은 타이완에서 Moh 등(1996)에 의해 수행되었으며, 단단한 점성토 지반 위의 느슨한 사질토 지반에서

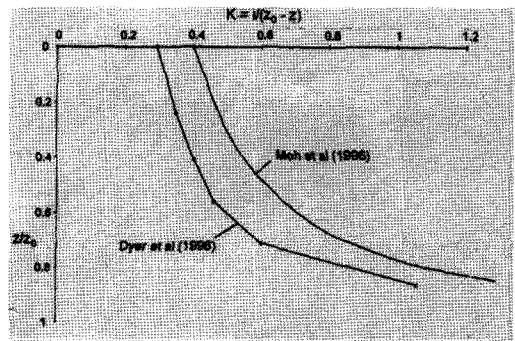


그림 3. 사질토 지반에서의 K값의 분포

의 지중침하 측정은 Dyer 등(1996)에 의해 수행된 바 있다(그림 3 참조).

3. 2차원 실내모형실험

3.1 모형실험 및 장비

모형실험은 그림 4에서 보는 바와 같이 폭 910 mm, 높이 720 mm, 길이 75 mm의 강재 프레임 안에 사질토로 모사되는 알루미늄 봉을 쌓아 올릴 수 있다. 모형터널장비는 초기 외경이 100 mm이며 외경이 점진적으로 축소되면서 터널굴착 효과를 모사할 수 있다(이용주, 2008). 각각의 터널 깊이 $Z_0=270$ mm, $Z^0=420$ mm, $Z^0=470$ mm에서 실험을 수행하였다. 지표면에 작용하는 하중은 고려하지 않았다($\sigma_s=0$).

본 연구에 사용된 알루미늄 봉의 지름은 2 mm, 3 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, 20 mm이며, 길이는 모두 75 mm로 일정하다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 입자가 다양하게 혼합되는 S자 모양의 이상적인 입도분포를 나타낸다. 특히, 터널주변부에서는 비교적 입자가 작은 2 mm와 3 mm 알루미늄 봉을 집중적으로 배치하였다. 참고로 2 mm와 3 mm가 전체 입도분포에 차지하는 비율을 면적분포비(ADR)로 나타내면 20%를 차지함을 알 수 있다. 여기서, 전체면적은 강재 프레임의 폭과 높이를 곱한 값이다. 비교적 지름이 큰 알루미늄 봉은 터널굴착으로 인해 영향을 거의 받지 않은 실험 경계면인 강재 프레임 주변부에 배치하였다. ADR과 관련하여 서로 다른 지름의 알루미늄 봉의 양을 계산하면 그림 5(b)와 같

이 2 mm와 3 mm 봉이 가장 많이 사용됨을 알 수 있다. 알루미늄 봉을 통해 사질토 지반을 모사함으로써 얻는 주된 효과는 다음과 같다.

- 강체의 이동이나 회전을 눈으로 직접 관찰 할 수 있다.
- 평면변형률 조건을 잘 만족한다.
- 강체가 스스로를 지탱하므로 측면에 벽이 따로 필요 없다. 따라서 벽마찰을 완전히 제거할 수 있다.
- 알루미늄의 비중은 모래 또는 자갈과 유사하나 표면 거칠기를 고려할 수 없다.
- 실험시간을 기존의 모래 또는 점토에 비해 많이 단축할 수 있다.
- 전면에서의 계측이 용이하여 변형형태를 상세하게 규명할 수 있다.

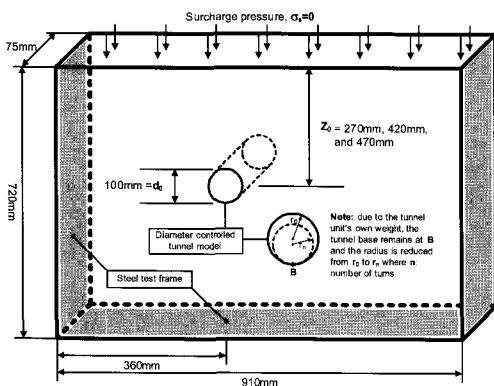
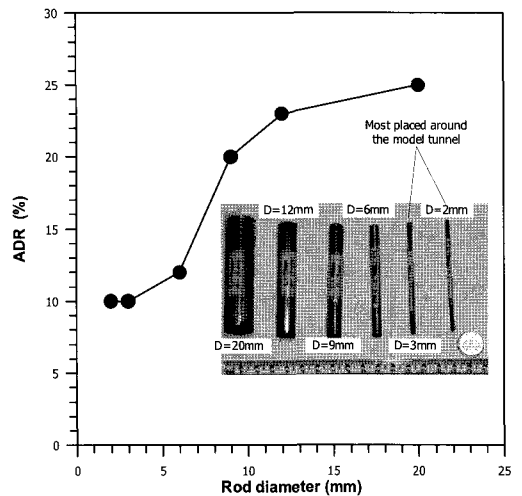
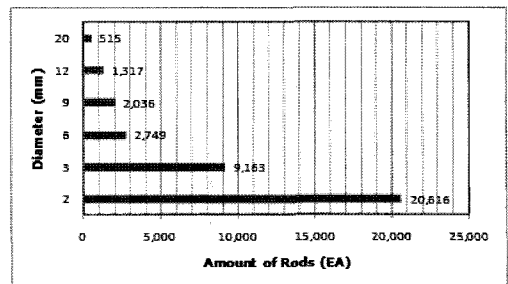


그림 4. 2차원 터널모형실험 모식도



(a) 입도분포곡선



(b) 알루미늄 봉 사용량

그림 5. 다양한 지름의 알루미늄 봉

3.2 실험절차 및 사진계측의 적용

모형터널 깊이에 따른 실험 절차는 먼저, 알루미늄 봉을 쌓기 위해 미리 제작된 나무판을 강재프레임 후면에 배치하고 알루미늄 봉을 쌓는다. 다음으로는 모형터널을 위치시키고 지름이 작은 알루미늄 봉을 모형터널 주변에 배치한다. 끝으로 은색 스티커가 부착된 알루미늄 봉을 랜덤하게 터널주변에 배치시킨다. 모든 셋팅이 끝나면 강재프레임 후면의 나무판을 탈착한다. 이 때 알루미늄 봉이 교란되지 않도록 특별히 주의한다. 터널굴착에 대한 모사는 모형터널 장비 앞뒤의 노브를 회전시키면서 터널의 지름을 점진적으로 축소시킨다. 모형터널의 지름을 조정할 때 알루미늄 봉이 교란이 되지 않도록 각별한 주의를 기울였으며, 모형터널에 하중을 가하거나 비틀림이 발생되지 않도록 하였다. 표 1은 노브의 회전수에 따른 모형터널 장비의 축소된 지름(D_R)과 지반손실(V_L)에 대한 값들을 정리한 것이며 지름이 크게 축소될수록 지반손실이 커지는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 터널주변의 명확한 전단변형을 측정하기 위해 지반손실을 크게 유도하였다. 그러나, 실제 지하수 위의 사질토 지반의 경우 터널굴착시 약 2~5%의 부피 손실이 적절하다 할 수 있으며 이러한 지반손실은 작

업자의 숙련도에 크게 의존한다(Attewell 등, 1986). 참고로 Atkinson과 Salfors(1991)에 따르면 터널붕괴와 관련한 전형적인 전단변형률 값은 약 2~30% 범위에 있다. 이러한 전단변형률은 터널굴착으로 인한 지반손실이 커지면 지표면으로 전단변형이 크게 전이된다는 사실을 모형실험을 통해 확인할 수 있었다.

사진계측을 위해 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 372개의 은색 스티커가 부착된 알루미늄 봉과 25개의 기준점을 사용하였다. 이미지 프로세싱을 통해 그림 6(b)와 같은 삼각형의 유한요소망을 얻을 수 있다(Lee와 Bassett, 2006)

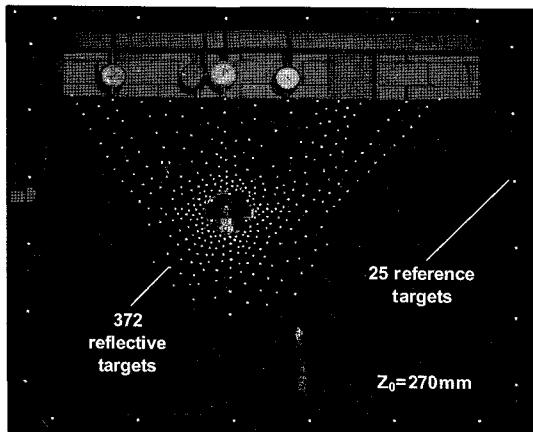
4. 수치해석

4.1 모형거동에 대한 수치해석

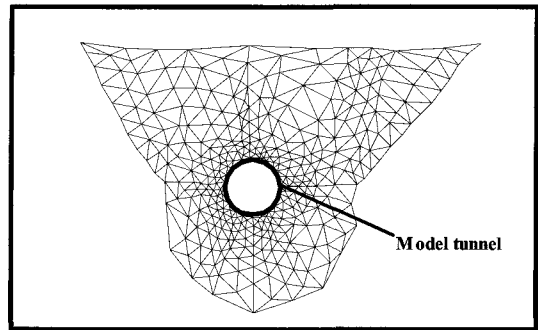
CRISP 유한요소프로그램을 사용하여 터널거동을 모사하였다. 사진계측에서 얻은 터널거동에 대한 값을 역으로 수치해석에 적용하였다. 그림 7은 수치해석을 위한 유한요소망을 나타낸다. 그림 7에서 보는 바와 같이 터널은 유한요소망의 중심이 아니라 왼편에 위치하고 있다. 이는 향후 파일-지반-터널의 상호거동에 대한 모형 실험을 수행하기 위해 파일이 위치하는 터널 오른편의

표 1. 지름 축소와 지반손실 값

$D_R(\text{mm})$	0.48	0.96	1.59	1.91	2.39	2.79	3.18	3.66	3.98	4.38
$V_L(\%)$	1.89	3.76	6.23	7.45	9.27	10.77	12.26	14.03	15.20	16.65



(a) 모형터널과 은색 스티커



(b) 삼각형 유한요소망

그림 6. $Z_0=270$ 에서의 모형터널 시험

공간을 확보하기 위해서이다(이용주, 2008). 사전 수치 해석 결과, 이로 인한 경계면의 영향은 무시할 수준임을 확인하였다.

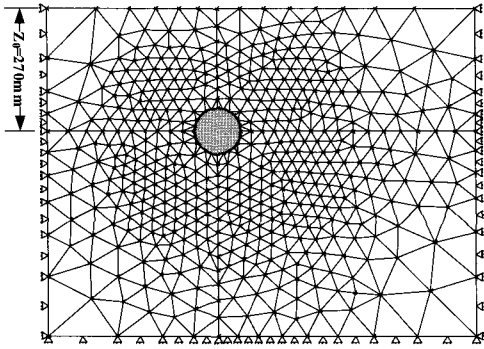


그림 7. $Z_0=270$ mm 모형터널실험에 대한 수치해석 유한요소망

4.2 지반모델 및 물성치

지반의 구성모델은 선형-완전 소성(linear-perfectly plastic)인 Mohr-Coulomb 모델로 비연관성 흐름 법칙(non-associated flow rule)을 고려하였다. 모형터널은 경계면이 2절점 바(bar) 요소로 모델링하였다. 지반의 깊이에 따라 탄성 계수가 선형적으로 증가하는 Gibson 지반과 바 요소인 터널 경계면의 물성치를 정리하면 표 2와 같다.

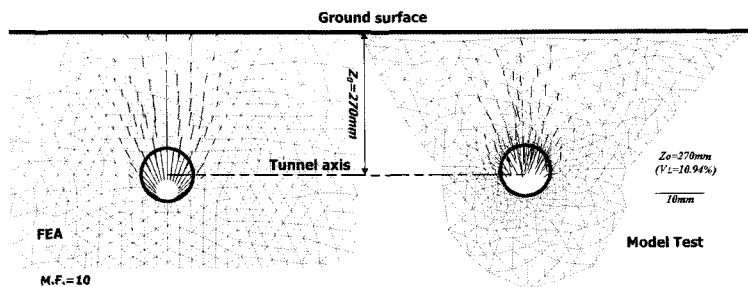
5. 해석 결과

5.1 모형실험과 수치해석 비교

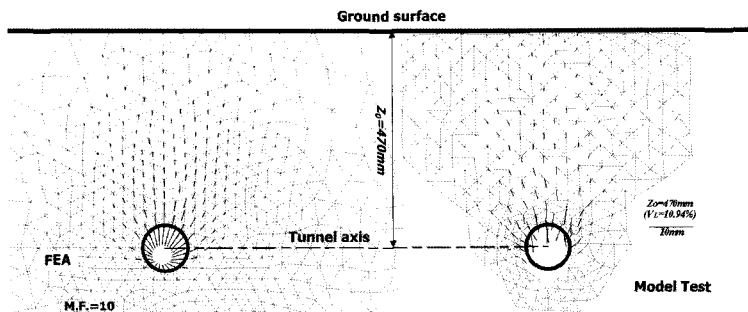
모형실험에 대해 사진계측을 통해 얻은 변위벡터를 수치해석과 비교한 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 비교적 얇은 터널인 $Z_0=270$ mm 인 경우와 비교적 깊은 터널인 경우 $Z_0=470$ mm 경우 모두

표 2. 유한요소해석에 적용된 모델의 물성치

모델	c' (kPa)	v	ϕ' (°)	ψ (°)	E_0 (kPa)	m_E (kPa)	r (kN/m ³)
지반	0.1	0.35	23	15	1,600	10,000	24
터널*	-	0.2	-	-	1.55107	-	-



(a) 터널 심도 $Z_0=270$ mm에서 변위벡터($V_L=10.94\%$)



(a) 터널 심도 $Z_0=470$ mm에서 변위벡터($V_L=10.94\%$)

그림 8. 수치해석과 모형실험 결과 변위벡터의 비교

수치해석 결과와 모형실험 결과가 유사하게 나타났다. 얇은 터널인 경우 변위벡터가 지표면까지 확장됨을 확인할 수 있었다. 이와는 대조적으로 깊은 터널인 경우 주로 터널주변부 변위가 크게 일어나는 반면 지표면까지는 그 영향이 미미한 것으로 나타났다. 이러한 비교를 통해 사질토 지반에서 터널굴착으로 인한 변위벡터의 분포는 점성토 지반처럼 넓게 분포하지 않고 터널을 중심으로 좁게 분포됨을 확인할 수 있었다.

5.2 지중침하 조사위치 및 i 값 산정

터널이 위치하는 심도별 조사위치는 그림 9와 같다. 또한, 지중침하(S_v)를 조사하기 위해 적용된 수평위치는 그림 10과 같다. 터널의 중심인 $x=0$ 에서부터 50 mm 간격으로 $x=300$ mm까지 조사하였다.

지표면 침하에 해당하는 S_v 는 유한요소해석과 터널

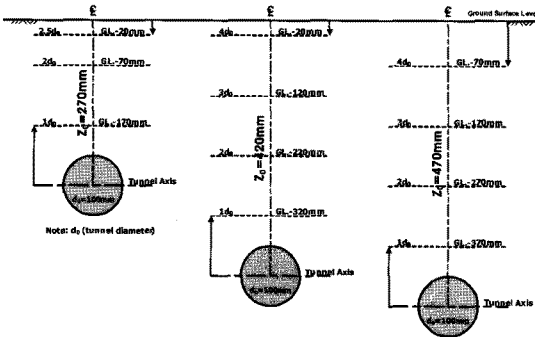


그림 9. 터널심도에 따른 지중침하 조사위치

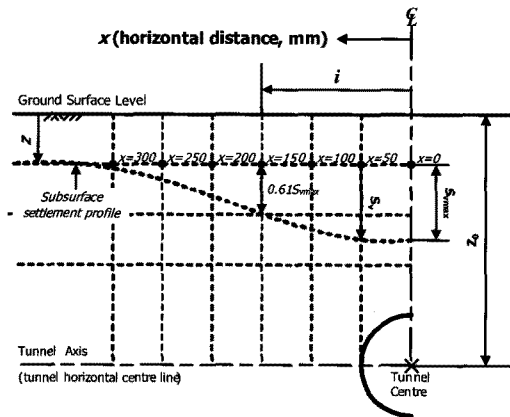


그림 10. 지중침하 양상과 터널중심에서 수평거리에 따른 조사위치

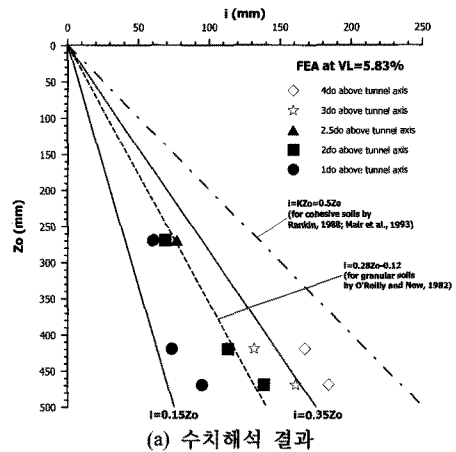
모형실험의 디지털 이미지 프로세스에서 얻어진 수직변위에 대한 등고선을 통해 결정하였으며, i 값의 크기를 결정하기 위해 먼저 침하(S_v)와 거리(x)를 $\log S_v - x^2$ 으로 나타내고 다음의 식 (2)을 이용하여 결정한다.

$$S_v = 0.61 S_{vmax} \quad (2)$$

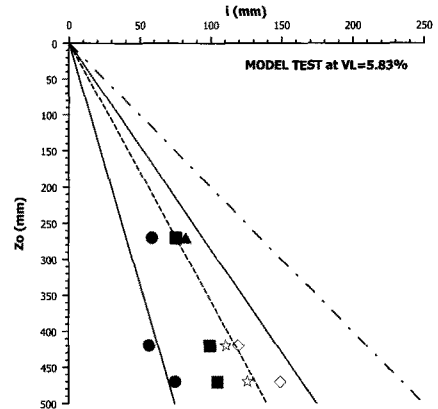
여기서, S_v 는 에 해당되는 거리를 의미한다. 따라서 x 로부터 쉽게 i 값을 계산할 수 있다.

5.3 모형터널실험을 통한 지중침하식 산정

Attewell 등(1986)이 제안한 지반손실 2~5% 범위에서 최대값인 5%에 가장 가까운 지반손실(V_L) 5.83%인 경우를 기준으로 깊이 별로 산정한 i 값과 터널심도(Z_0)에 대한 관계를 그래프로 나타내면 그림 11과 같다.



(a) 수치해석 결과



(b) 모형실험 결과

그림 11. 수치해석과 모형실험 $i-Z_0$ 관계 비교($V_L=5.83\%$)

그림 11에서 보는 바와 같이 수치해석과 모형실험 결과, 본 연구에서 제안한 사질토의 상한선 한계식인 $i=0.35Z_0$ 와 하한선 한계식인 $i=0.15Z_0$ 사이에 분포하는 것으로 나타났으며, 지중침하가 지표면에 가까이 갈수록 상한선 한계식에 근접하는 것으로 나타났다. 참고로 Rankine (1988)과 Mair 등(1993)이 제안한 점성토 기반에서의 관계식인 $i=0.5Z_0$ 와 O'Reilly와 New(1982)가 제안한 사질토 기반에서의 관계식인 $i=0.28Z_0-0.12$ 도 표시하였다. 모형실험 결과, 터널 중심축으로부터 $2d_0$ 이상인 위치에서의 i 값은 O'Reilly와 New(1982)의 제안식에 근접하는 것으로 나타났다.

지반손실(V_L)이 5.83%인 경우, 수치해석 및 모형실험 결과를 지중침하 폭에 관련된 변수인 K와 무차원의 깊이인 계수인 Z/Z_0 로 나타내면 그림 12와 같다.

그림 12에서 보는 바와 같이 수치해석 및 모형실험 결과, K값은 지표면에 가까이 갈수록 Dyer 등(1996)과 Moh 등(1996)이 제안한 현장에서 측정된 자료를 바탕으로 계산한 K값 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구를 통해 모형실험 결과로부터 얻은 K값을 회귀분석법으로 구하면 Dyer 등(1996)과 Moh 등(1996)이 제안한 비선형 값이 아닌 선형 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$K = \frac{Z/Z_0 + 0.56}{2.04} \quad (3)$$

여기서, K는 그림 12에서 나타낸 이다.

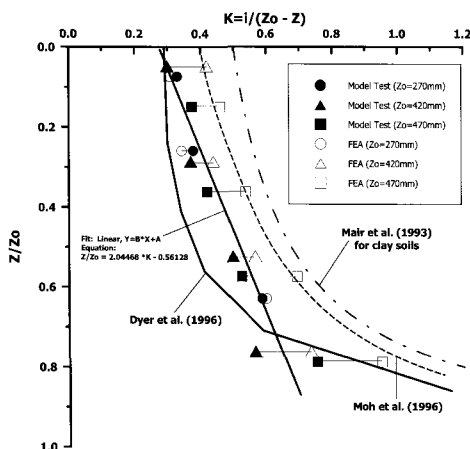


그림 12. 수치해석과 모형실험 K-Z/Z₀ 관계 비교($V_L=5.83\%$)

6. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 모형실험에 대해 사진계측을 통해 얻은 변위벡터를 수치해석과 비교한 결과, 비교적 얇은 터널인 $Z_0=270$ mm인 경우와 비교적 깊은 터널인 경우 $Z_0=470$ mm 경우 모두 수치해석 결과와 모형실험 결과가 유사하게 나타났다.
2. 수치해석과 모형실험 결과, 본 연구에서 제안한 사질토의 상한선 한계식인 $i=0.35Z_0$ 와 하한선 한계식인 $i=0.15Z_0$ 사이에 분포하는 것으로 나타났으며, 지중침하가 지표면에 가까이 갈수록 상한선 한계식에 근접하는 것을 확인할 수 있었다.
3. 모형실험 결과, i 값은 터널 중심축으로부터 $2d_0$ 이상인 위치에서는 O'Reilly와 New(1980)의 제안식에 근접하는 것으로 나타났다.
4. 수치해석 및 모형실험 결과, K값은 지표면에 가까이 갈수록 Dyer 등(1996)과 Moh 등(1996)이 제안한 현장에서 측정된 자료를 바탕으로 계산한 K값 사이에 분포하는 것으로 나타났다.
5. 본 연구를 통해 모형실험 결과로부터 얻은 K값을 회귀분석법으로 구하면 Dyer 등(1996)과 Moh 등(1996)이 제안한 비선형 값이 아닌 선형 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 알루미늄 봉을 건조된 사질토로 모사하여 실험을 수행하였기 때문에 지하수위의 영향을 받지 않는 Dyer 등(1996)의 현장조건에 부합된다고 할 수 있다. 그러나, 국내의 대부분 현장에서는 지하수위와 터널굴착공법 등이 지중침하에 크게 영향을 끼치므로 향후, 다양한 지반조건 및 굴착공법 등을 고려한 모형실험 개발과 현장에서 측정된 지중침하 데이터를 토대로 실질적인 지중침하식을 제안할 필요가 있다.

참고문헌

1. 이용주 (2008), “기존 파일기초에 근접한 터널굴착으로 인한 전단변형을 형성에서의 경계선”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제3호, pp. 283-293.

-
2. 손무락, 윤종철 (2009), “터널굴착으로 발생한 지반거동에 대한 수치해석적 분석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 229-242.
 2. Atkinson, J. H. and Salfors, G. (1991), “Experimental determination of soil properties”, In Proceeding of the 10th European Conference on Soil Mechanics, Vol. 3, pp. 915-956.
 3. Attewell, P. B. (1977), “Ground movements caused by tunnelling in soil”, Proceedings of International Conference on Large Movements and Structures, Geddes, J. D. (ed), London, pp. 812-948.
 4. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986), Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, London.
 5. Cording, E. J. (1991), “Design philosophies for tunnels in soil”, Proceedings of International Conference on Underground structures Design and Instrumentation, pp. 56-79.
 6. Dyer, M. R., Hutchinson, M. T. and Evans, N. (1996), “Sudden valley sewer: a case history”, International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair, R. J. and Taylor, R. N. (eds), London: Balkema, pp. 671-676.
 7. 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 1, pp. 79-96.
 8. Mair, R. J., Taylor, R. N. & Bracegirdle, A. (1993), “Subsurface settlement profiles above tunnels in clays”, Géotechnique, Vol. 43, No. 2, pp. 315-320.
 9. Moh, Z-C, Ju, D. H. and Hwang, R. N. (1996), “Ground movements around tunnels in soft ground”, International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair, R. J. and Taylor, R. N. (eds), London: Balkema, pp. 725-730.
 10. O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982), “Settlements above tunnels in the United Kingdom-theirmagnitudeandprediction”, Tunnelling '82, London: IMM, pp. 173-181.
 11. Potts, D. M. (1976), Behaviour of lined and unlined tunnels in sand. PhD thesis, University of Cambridge.
 12. Rankin, W. J. (1988), “Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects”, Engineering Geology of Underground Movement, Geological Society, Engineering Geology Special Publication, No. 5, pp. 79-92.
-
- 접수일(2009.12.28), 수정일(2009.1.4), 게재확정일(2010.1.18)