근거리 사진계측기법을 이용한 강관보강 모형터널굴착의 지반거동 분석

이정환¹ · 이용주^{2*}

¹서울과학기술대학교 공과대학 건설시스템공학과 석사
²서울과학기술대학교 공과대학 건설시스템공학과 조교수

Analysis of ground behavior for model tunnel excavation with pipe roof reinforcement using close range photogrammetric technique

Jung-Hwan Lee¹, Yong-Joo Lee^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology
²Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology

ABSTRACT: In congested urban areas, constructions of tunnel structures have become necessary due to a lack of surface space. The excavation of any tunnel generated the ground disturbances of surrounding ground and displacements is major concern. Therefore, a study of tunnel stability is necessary. In this study, the authors have investigated the stability and failure pattern of tunnel through the model tunnel test. In this study, the close range photogrammetry was used to measure the ground deformation. The measured data was converted to displacement vectors and contours. And then it compared to FE analysis and empirical formula. In addition, this study presented the comparison between steel pipe reinforced model tunnel and unreinforced model tunnel. The ground deformation for both the steel pipe reinforced model tunnel and the unreinforced model tunnel was analysed.

Keywords: Model tunnel, Close range photogrammetry, Ground surface settlement, steel pipe reinforcement, Image processing

초 록: 혼잡한 도심지에서는 지상의 공간부족에 따른 터널 구조물에 대한 시공의 필요성이 늘어나고 있다. 터널은 굴착 시 주위 지반의 교란 및 변위를 발생시키는데, 그에 따른 안정성 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 터널굴착에 따른 지반의 거동을 측정하기 위해 모형터널 장비를 개발하였다. 모형터널은 터널굴착을 모사하기 위해서 터널 내부의 일정한 물의 양을 조절하면서 외경을 축소한다. 그에 따라 발생하는 체적손실이 터널굴착에 따른 지반의 변위를 발생시킨다. 지반의 변형 측정은 근거리 사진계측기법을 사용하였으며, 이를 변위분포도와 변위벡터로 나타내었고, 유한요소 수치해석, 기존 문헌, 이론 및 경험식들과 비교하였다. 또한, 터널 천단부 강관 보강 및 무보강의 터널굴착에 따른 모형시험을 진행하여 지반의 거동을 분석하였다. 본 연구의 실내모형터널시험은 지반의 자세한 변위 데이터를 얻기 위해 흙으로 가정한 알루미늄봉과 근거리 사진계측을 사용한 이상화된 2차원의 연구이다. 그 결과, 유한요소 수치해석에서의 흙의 변형 패턴이 실제 모형 시험과 상당히 유사함을 확인 및 검증 할 수 있었다.

주요어: 모형 터널, 근거리 사진계측기법, 지표면 침하, 강관 보강, 이미지 프로세싱

1. 서 론

현재 도심지에서는 지상의 공간부족문제가 발생하고 있으며 그에 따른 터널 구조물의 필요성이 점차 증가하고 있다. 터널은 굴착 시 주위 지반의 교란 및 변위를 발생시키는데, 그에 따른 안정성 검토가

*Corresponding author: Yong-Joo Lee
E-mail: ucesyj1@seoultech.ac.kr

Received July 3, 2014; Revised July 14, 2014;
Accepted July 21, 2014

만드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실내모형시험의 모형터널을 통해 터널의 안정성과 파괴 패턴을 조사하였다. 본 연구에서는 터널굴착에 따른 지반의 거동을 측정하기 위해 모형터널 장비를 개발하였다. 모형터널은 터널굴착을 모사하기 위해서 터널 내부의 일정한 물의 양을 조절하면서 외경을 축소하고 그에 따라 발생하는 체적손실(Volume loss)이 터널굴착에 따른 지반의 변위를 발생시킨다. 모형터널시험에서는 터널의 천단부에 강관보강과 무보강, 2가지 조건으로 시험을 진행하여 터널굴착에 따른 지반의 거동을 분석하였다. 지반의 변형 측정은 근거리 사진계측기법을 사용하였으며, 이를 변위분포도와 변위벡터로 나

타내었고, 유한요소 수치해석, 기존 문헌, 이론 및 경험식들과 비교하였다. 근거리 사진계측기법과 수치해석을 이용한 강관보강 및 무보강 터널모형시험은 지반거동해석의 정확성을 높이고 실제 보강에 따른 안전성을 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실내모형시험

2.1 모형터널장치

모형시험에서 터널굴착에 따른 지반의 거동을 파악하기 위하여 모형터널장치를 개발하였다. 모형터널장

Fig. 1. Model test device (Soil container box, Model tunnel device: (a) membrane, (b) plastic body and disc, (c) hydraulic pump)

Fig. 2. Tunnelling simulation in the model test

치는 지반조건을 만들어줄 모형토조(가로 1,500 × 세로 1,000 × 길이 100 mm)와 터널의 내관을 이루는 플라스틱 본체(직경 100 mm, 길이 100 mm), 터널의 외경이 되어줄 멤브레인, 터널의 볼륨을 조절할 수압 펌프로 이루어져 있다(Fig. 1). 모형토조의 프레임은 스틸로 제작되었으며, 토조 전면과 후면은 아크릴로 구성되어 있다. 모형토조 하단으로부터 300 mm 위로 토조 중심부에 모형본체를 설치 할 수 있는 공간이 구성되어 있다. 모형터널장치는 Fig. 1(b)의 플라스틱 본체 양 끝단에 부착되어 있는 플라스틱 고정판을 제거하고 멤브레인을 덮어씌운다. 그 후 터널 본체를 모형토조에 설치하고 고정판으로 결합한 후 수압펌프를 연결하여 시험을 진행한다. 모형터널은 멤브레인을 결합하고 모형터널 내부에 약 800 mL의 물을 넣어 터널 초기의 외경이 100 mm가 되게 한다. 모형터널시험은 터널 내부에 물을 가득 채운 후 물의 양을 점차 감소시켜 터널의 체적손실(Volume loss)을 발생시킨다. 본 연구는 터널 내부의 체적손실을 터널 굴착과정으로 가정한다. 2차원으로 이상화된 터널의 체적손실은 지반의 지표침하량과 동일하게 설정하여 시험을 진행한다(Fig. 2). 여기서 발생하는 터널의 체적손실은 식 (1)과 같이 전체 터널면적에 대한 터널의 체적손

실로 설정한다. 또한 일반 기계식 모형터널과 달리 수압을 사용하는 본 시험은 체적손실에 따른 지반거동을 좀 더 세밀하게 측정하였다(Lee, 2004).

$$V_L = \frac{V_s}{V_{tunnel}} (\times 100, \%) \quad (1)$$

2.2 모형터널 직경변화의 교정(Calibration)

모형터널시험에서 모형터널의 체적변화에 따른 지반의 거동을 측정하기 위해서는 터널 안 물의 양에 따라 터널 직경이 얼마나 감소하고 증가하는지를 정확하게 계산해야한다. 따라서 모형터널 칼리브레이션의 정확도에 따라 지반거동측정의 정확성이 좌우된다. 칼리브레이션 시험은 모델 터널을 이상화시키고, 평면 변형을 조건에서 시험을 진행하였다. 먼저 모형터널 본체에 멤브레인을 결합 한 후 모형터널 양쪽에 고정 장치를 설치하여 모형터널을 조립한다. 다음으로 조립된 모형 터널과 수압펌프를 연결하여 모형터널에 물을 주입한다. 터널의 외경이 약 100 mm가 되는 800 mL의 물을 주입한 후 터널의 면적을 계산, 터널체적을 0%로 설정한다. 그 후 약 2 MPa의 공기압

Fig. 3. Tunnel calibration test

Table 1. V_L (%) data in tunnel calibration test

Step	Amount of water (ml)	Diameter (mm)	V_L (Volume loss,%)
0	801.5	9.94	0
1	787.3	9.86	1.5
2	773.1	9.78	3
3	754.2	9.68	5
4	735.4	9.57	7
5	707.0	9.41	10
6	669.2	9.20	14
7	631.5	8.99	18
8	423.8	7.83	40

을 가진 펌프의 밸브를 조정하여 일정한 속도로 물을 빼면서, 변하는 터널의 직경을 지속적으로 기록한다. 이렇게 기록한 물의 양과 터널의 직경을 가지고 물의 양과 Volume loss의 상관관계를 파악한다(Table 1). 터널굴착이 진행되기 전의 초기상태를 터널 외경 100 mm로 설정하고 그에 따른 터널의 면적을 계산한 후 Volume loss를 설정한다. 총 8단계에 걸쳐 칼리브레이션을 진행하고 12번의 반복시험을 통해 평균 값을 산정하였다(Fig. 3, 4).

2.3 모형시험장비 및 절차

본 연구에서는 모형터널시험장비 외에 알루미늄 봉을 터널 강관과 지반측정기구로 사용하였다. Fig. 5(b)와 같이 직경 5 mm의 알루미늄 봉 13개를 실제 터널의 현장적용 수치와 비례하도록 설정하여 터널 천단부에 직각방향으로 설치하였다. 또한 직경 3 mm의 알루미늄 봉 99개를 지반에 설치하여 근거리 사진 계측기법으로 측정한다. 알루미늄 봉은 0.26 g으로

Fig. 4. Calibration for the model tunnel device

(a) Combine soil container box with model tunnel

(b) insertion of steel pipe reinforced

Fig. 5. Test procedure

가벼워 자중에 따른 지반침하는 미미하다. 모형시험은 사진계측을 위해 검은색으로 염색한 표준사를 사용하여 일정한 간격 및 다짐으로 지반을 조성하고 99개의 알루미늄 봉 또한 일정한 간격으로 설치하여 지반으로 가정한 후 그 움직임에 따른 지반의 거동을 파악한다(Lee et al, 2010). 지반의 물성치는 실내시험을 통해 구하였으며, 수치해석과 동일하게 적용하였다(Table 3).

모형터널시험 설정 과정은 다음과 같다.

- (1) 모형터널 및 토조 결합 (Fig. 5(a))
- (2) 터널 하부지반 설정
- (3) 터널 천단부 강관 설치 (Fig. 5(b))
- (4) 터널 상부 지반 설정 및 지반으로 가정한 알루미늄 봉 설치

(5) 지표 침하계 설치

모형터널시험 설정을 마치고 칼리브레이션 결과 값에 따라 총 8단계의 터널 체적에 맞춰 지반의 거동을 측정한다. 지표침하의 측정은 지표면에 총 9개의 다이얼 게이지를 100 mm의 간격을 두고 설치하여 터널 체적변화에 따라 각각의 단계마다 지표침하를 측정하였다. 각각의 단계마다 터널 중앙부에서 최대지표침하가 발생하였고, 좌우측으로 침하량이 줄어드는 일반적인 터널침하분포도를 나타내었다.

2.4 모형시험결과

모형터널시험을 통해 각각의 터널 체적 단계에 따

(a) Volume loss 5%

(b) Volume loss 18%

Fig. 6. Ground deformation for tunnel excavation (unreinforced model tunnel)

른 결과 값을 나타내었다. 본 연구에서는 실제 현장에서의 터널굴착을 나타내는 터널 체적 5%와 터널굴착에 따른 파괴 패턴을 확인하기 위한 18%, 두 조건에서의 결과 값을 나타내었다(Fig. 6). 실제 모형시험에서는 Fig. 6에서 나타난 바와 육안으로 지반의 거동을 파악하기 매우 힘들다. 따라서 근거리 사진계측기법을 사용하여 세밀한 지반의 거동을 자세하게 나타내었다. Fig. 7은 9개의 다이얼 게이지에서 측정한 터널 굴착에 따른 지표침하를 나타내고 있다. 터널 체적손실(Volume loss)이 커질수록 터널 중심부의 침하량이

가장 많이 증가하여 최대지표침하를 나타내고 있으며 좌우측으로 점차 지표침하량이 줄어드는, 전형적인 터널굴착에 따른 지표침하패턴을 나타내고 있다. 터널 강관보강 및 무보강에 따른 최대지표침하의 값 차이는 Table 2에 나타나 있으며, 체적손실이 작을수록 보강효과가 크게 나타나고 있다. Table 3는 Fig. 2에서 나타내는 터널 내 체적손실과 지표면 침하량을 비교한 표이다. 평면변형을 조건에서 모형터널 내 체적 손실량과 지표면 침하면적이 비슷함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7. Settlement of ground surface for model test

Table 2. Comparison of maximum ground settlement for V_L (%)

Settlement \ V_L (%)	1.5 %	3 %	5 %	7 %	10 %	14 %	18 %	40 %
Steel pipe reinforced (mm)	0.09	0.22	0.45	0.73	1.18	1.85	2.57	6.33
Unreinforcement (mm)	0.18	0.51	0.88	1.17	1.73	2.54	3.38	7.14
Reinforced effect (%)*	50.0	56.9	48.9	34.6	31.8	27.1	24	11.3

Note : $\ast \frac{(Unreinforcement - Steel pipe reinforced)}{Unreinforcement} \times 100(\%)$

Table 3. Comparison of area loss according to V_L (%)

(Unit : cm^2)

V_L (%)	1.5 %	3 %	5 %	7 %	10 %	14 %	18 %	40 %
Area loss of tunnel	1.14	2.36	3.96	5.56	7.91	10.99	14.00	29.29
Area of ground settlement (unreinforcement)	0.80	2.46	4.21	5.12	7.64	10.92	14.36	26.47

3. 근거리 사진계측

3.1 사진계측 설정

일반적으로 지반의 거동은 시각적으로 파악하기가 매우 어렵다. 따라서 근거리 사진계측기법을 사용하여 지반의 거동을 파악한다. 근거리 사진계측기법은 디지털 카메라를 사용하여 다각도의 이미지를 획득한 후 이미지 프로세싱 작업을 거쳐 지반의 변위를 산정

하는 계측기법이다. 본 연구에서는 고해상도의 디지털 카메라 Canon EOS 5D Mark II를 사용하여 지반으로 가정된 직경 3 mm의 알루미늄 봉을 측정하여 지반의 변위를 구하였다. 본 연구에서는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 토조 주위 18개의 고정 포인트들을 기준점으로 하여 지반으로 가정한 99개의 목표점(알루미늄 봉)들을 측정한다(Fig. 8) (Lee et al, 2006). 근거리 사진계측기법은 5,616×3,744 pixel의 높은 해상도를 가진 DSLR 카메라를 사용하여 6.4 micron의 세밀한

Fig. 8. Analysis method of ground deformation using close range photogrammetry

Fig. 9. Digital camera position in close range photogrammetry

픽셀 사이즈로 지반의 거동을 자세하게 측정할 수 있다(Lee et al, 2012).

3.2 사진계측과정

근거리 사진계측은 정면에서 두장, 좌측, 우측에서 각각 한 장씩 총 4장의 이미지를 획득하여 목표점들을 측정 한다(Fig. 9). 각각의 단계마다 정면사진과 정면에서 카메라를 90°로 회전한 사진, 좌측면 사진, 우측면 사진을 촬영하여 총 8단계, 32장의 이미지를 촬영 한다(Fig. 9). 획득한 이미지들은 VMS 프로그램을

통하여 다각도의 이미지들을 결합하여 각각의 목표점들에 대한 좌표들을 측정하고 이미지 프로세싱 과정을 거쳐 포인트들에 대한 수직변위, 수평변위분포도, 변위벡터 등을 나타낼 수 있다. Fig 10은 근거리 사진 계측기법의 절차를 나타내고 있다.

3.3 이미지 프로세싱

근거리 사진계측으로 획득한 이미지들을 이미지 프로세싱 과정을 거쳐 각각 수직변위, 수평변위, 변위 벡터 분포도로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 터널

Fig. 10. Flow chart of close range photogrammetric and image processing

Fig. 11. Comparison of vertical displacement contours (unreinforced model tunnel)

Fig. 12. Comparison of horizontal displacement contours (unreinforced model tunnel)

Fig. 13. Comparison of displacement vectors (unreinforced model tunnel)

Fig. 14. Comparison of vertical displacement contours (reinforced model tunnel)

체적변화 5%와 18%에 대한 변위분포도를 나타내고 있다. 수직변위분포도의 경우 터널 상부에서 가장 큰 침하가 발생하며 전형적인 굴뚝형태의 침하 패턴을 보였으며 체적손실(Volume loss)이 커질수록 그 변위 또한 커지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 11, 14). 수평 변위의 경우 터널 상부 좌우에서 가장 큰 변화가 발생하였으며, 터널 체적손실이 커질수록 터널 좌우측으로 변위가 커져 나갔다(Fig. 12, 15). 터널시험의 수직, 수평변화를 모두 나타내는 변위벡터분포도는 체적손실이 발생할수록 터널 중심부를 향해 지반의 변위가 발생하는 전형적인 터널침하 패턴을 보였다(Fig. 13,

16). 또한 터널 강관보강과 무보강시의 변위분포를 비교하였을 때, 변위의 경향은 비슷하나 그 값들이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 수치해석

4.1 해석조건

근거리 사진계측기법을 통한 지반거동 측정값의 정확도를 비교·분석하기 위해 수치해석을 진행하였다. 각각의 물성치는 Table 4와 같으며 실제 사용한

Fig. 15. Comparison of horizontal displacement contours (reinforced model tunnel)

Fig. 16. Comparison of displacement vectors (reinforced model tunnel)

Table 4. Input parameters in FE analysis of tunnel model test

Parameters	Soil layer	Parameters	Tunnel
E (kN/m^2)	900	EA (kN/m)	1.4×10^7
c (kPa)	0.1	EI (kNm^2/m)	1.43×10^5
ν	0.35	ν	0.15
Φ' ($^\circ$)	41	d (m)	0.3501
Ψ ($^\circ$)	11	w (kN/m/m)	8.4
γ (kN/m^3)	16.5		

E : Young's modulus, c : Cohesion, ν : Poisson's ratio, Φ' : Angle of shearing resistance, Ψ : Dilation angle, γ : Unit weight of soil

모래지반의 실내시험을 통해 나타내었다. 수치해석의 경우 지반유한요소 해석프로그램인 PLAXIS 2D 및 3D를 사용하여 해석을 진행하였으며, 모델링 조건 또한 터널모형시험과 일치하여 해석을 실시하였다.

4.2 2차원 수치해석

Fig. 17은 2D 수치해석의 모델링 단면도를 나타내고 있다. 실제 모형시험과 동일한 조건으로 Volume 5%에 대한 수치해석을 진행하였다. 그러나 2차원 수치해석에서는 강관보강에 대한 모델링이 어렵다. 따라서 Fig. 17(b)에서 보는 바와 같이 각각의 강관을 하나의 보강영역으로 설정하여 모델링을 진행하였다. 강관보강영역에 따른 물성치는 지반의 복합 등가 탄

성계수를 사용하여 설정하였다(Lee et al 2014). Fig. 18은 실제 강관보강 및 무보강의 PLAXIS 2D의 모델링을 나타내고 있으며, Fig. 18, 19, 20은 수치해석 결과에 대한 수직변위, 수평변위분포도 그리고 변위 벡터 분포도를 나타내고 있다. 그 결과 값을 이미지 프로세싱 값과 비교해보면 변위분포도 및 파괴패턴이 전형적인 터널굴착에 따른 지반거동으로 일치하였고, 터널 천단부의 상부부분(5 cm)에서 지반변위가 비슷하게 나타남을 확인하였다(Table 5). 수치해석에서는 이미지 프로세싱 결과보다 좀 더 넓은 범위에 걸쳐 지반의 거동이 발생하고 있는데 이는 수치해석에서의 물성치 적용과 경계면 조건(boundary condition)에 따른 결과로 보인다.

Fig. 17. 2D Geometric condition of model tunnel test

Fig. 18. 2D Comparison of deformed mesh for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 19. 2D Comparison of vertical displacement contours for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 20. 2D Comparison of horizontal displacement contours for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 21. 2D Comparison of displacement vectors for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 22. 3D Geometric condition of model tunnel test

4.3 3차원 수치해석

3차원 수치해석에서는 터널 천단부에 각각의 강관을 설정하여 세밀한 수치해석을 진행하였다. 3D해석의 경우 모형토조 크기와 동일하게 z방향 10 cm까지 모델링하여 터널 체적손실 5%에 대한 수치해석을 실시하였다. 강관에 대한 물성치는 실제 알루미늄 봉에 대한 물성치를 적용하였으며, Fig. 22, 23에서와 같이 모형시험과 동일하게 13개의 알루미늄 봉을 설정하여 모델링을 설정하였다. Fig. 24, 25, 26은 3D 수치해석 결과의 수직, 수평변위 분포도, 변위벡터

Fig. 23. 3D Comparison of deformed mesh for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 24. 3D Comparison of vertical displacement contours for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 25. 3D Comparison of horizontal displacement contours for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Fig. 26. 3D Comparison of displacement vectors for reinforcement ($V_L = 5\%$)

Table 5. Ground displacement of tunnel crown area

Parameters	Vertical displacement (mm)		Horizontal displacement (mm)	
	unreinforcement	reinforcement	unreinforcement	reinforcement
Image Processing ($V_L = 5\%$)	2.84	1.97	0.48/-0.469	0.62/-0.61
2D FE Analysis ($V_L = 5\%$)	2.79	1.91	0.45/-0.45	0.60/-0.60
3D FE Analysis ($V_L = 5\%$)	2.68	1.79	0.39/-0.39	0.55/-0.55

분포도를 나타내고 있다. 각각의 수치해석 결과 값들은 이미지 프로세싱 결과와 비슷한 변위 분포도를 보였으며 3D에서 좀 더 작은 변위 값을 나타내었다 (Table 5).

4.4 수치해석과 모형시험의 지표침하 비교분석

본 연구에서는 근거리 사진계측기법과 수치해석을 사용하여 모형터널굴착에 따른 지반의 거동을 분석하였다. 이를 검증하기 위해 지표침하를 모형시험과 수치해석 그리고 이론법칙의 비교를 통해 나타내었다 (Fig. 27). 터널 체적손실 5%에 해당하는 모형시험의 지표침하값, 2D 및 3D의 수치해석 결과, 그리고 본 시험 조건의 가우시안분포 값을 비교하였다. 그 결과 실제 모형시험과, 2D 및 3D의 수치해석, 가우시안분포 값 모두 최대지표침하량이 거의 일치함을 보였다.

무보강의 터널모형시험에서는 실제 모형시험과 가우시안 분포 값은 거의 일치하였고 2D 및 3D의 경우에는 모형시험의 지표침하보다 좀 더 넓은 범위에 걸쳐 지표침하 값이 크게 나타나는 경향을 보였지만 이는 물성치 적용과 지반구성모델에 따른 수치해석 결과로 보인다. 강관 보강의 모형터널시험에서는 3D 수치해석에서 조금 낮은 지표침하 값이 발생하였는데 이는 실제 경계면 조건(boundary condition) 적용과 강관 물성치 적용에 따른 결과로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 실내모형시험의 터널 안정성과 파괴 패턴을 조사하기 위해서 모형터널 장비를 개발하였으며, 이를 통해 터널굴착에 따른 지반의 거동을 근거리 사진계측기법과 수치해석을 통해 비교 분석하였다.

Fig. 27. Comparison of ground surface settlement ($V_L = 5\%$)

1. 본 연구의 실내모형터널시험은 터널굴착에 따른 지반의 자세한 변위 데이터를 얻기 위해 근거리 사진계측을 사용하였다.
2. 근거리 사진계측기법과 수치해석을 이용한 강관 보강 및 무보강 터널모형시험은 지표면 침하와 터널 천단부분의 지반거동을 데이터화하여 비교·분석할 수 있었다. 지표면 침하의 경우, 모형시험과 가우시안 분포 값이 거의 일치하였고, 2D & 3D 수치해석에서는 최대지표침하는 일치하였으나 물성치 적용에 따라 좌우측 지표침하가 높게 나타났다. 또한 터널 천단부분도 이미지 프로세싱과 수치해석을 통해 그 변위량이 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 근거리 사진계측기법을 통해 지반거동해석의 정확성을 높이고 실제 보강시험에 따른 안전성을 파악할 수 있을 것으로 보인다.
3. 근거리 사진계측을 통해 측정된 지반의 변위분포들은 각각의 단계마다 수치해석 결과와 유사한 변위패턴을 보였으며, 터널 천단부분의 지반 변위량 또한 2D & 3D값과 유사하게 나타났다. 특히, Volume 5%의 지표침하 값에서 수치해석, 모형시험, 이론 등을 비교하였을 때 그 값이 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 3D FE 수치해석의 경우 2D해석보다 조금 낮은 변위 값을 나타내었는데 이는 3D해석의 물성치적용 및 경계면 조건(boundary condition)에 따른 정밀성으로 판단된다.
4. 역해석의 유한요소 수치해석에서의 흙의 변형 패턴이 실제 모형 시험과 상당히 유사함을 확인 및 검증 할 수 있었으며 향후 다양한 지반조건과 구조물에 따른 지반의 거동변화를 근거리 사진계측을 통해 측정할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문 한국연구재단 이공분야기초사업 중 일반연구지원사업인 “기본연구지원사업(NRF-2013R1A1A 2005101)”의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 대한 감사를 드립니다.

References

1. Lee, Y.J. (2004), “Tunnelling adjacent to a row of loaded piles”, Department of Civil and Environmental Engineering, University College London, June 2004.
2. Lee, Y.J. (2006), “Comparison of shallow model tunnel test using image processing and numerical analysis”, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 7, pp. 5-12.
3. Lee, Y.J., Song, G.J. (2010), “Shearing characteristics of aluminium rods using plane strain - shear box test and close range photogrammetric technique”, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 8, pp. 5-14.
4. Lee, J.H., Lee, J.M., Lee, C.N., Lee, Y.J. (2012), “Deformation measurment of model ground using close range photogrammetric technique”, KGS Fall National Conference 2012 Poster session P8_03.
5. Lee, J.H., Kong, S.M., Ryu, Y.H., Ku, J.C., Kim, I.S., Lee, Y.J. (2014), “Numerical analysis on direct-boring multi-pipe grouting method for tunnel reinforcement”, KGS Spring National Conference 2014 Poster session P4_06.