Research Paper

군말뚝 기초 하부 병렬터널 굴착 시 전단변형 거동 특성

김수빈¹ · 오영석² · 이용주^{3*}

¹비회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정 ²비회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학부연구생 ³정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

Shear strain behaviour due to twin tunnelling adjacent to pile group

Subin Kim¹ · Young-Seok Oh² · Yong-Joo Lee^{3*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Undergraduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

³Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

*Corresponding Author : Yong-Joo Lee, ucesyjl@seoultech.ac.kr

Abstract

In tunnel construction, the stability is evaluated by the settlement of adjacent structures and ground, but the shear strain of the ground is the main factor that determines the failure mechanism of the ground due to the tunnel excavation and the change of the operating load, and can be used to review the stability of the tunnel excavation and to calculate the reinforcement area. In this study, a twin tunnel excavation was simulated on a soft ground in an urban area through a laboratory model test to analyze the behavior of the twin tunnel excavation on the adjacent pile grouped foundation and adjacent ground. Both the displacement and the shear strain of ground were obtained using a close-range photogrammetry during laboratory model test. In addition, twodimensional finite element numerical analysis was performed based on the model test. The results of a back-analysis showed that the maximum shear strain rate tends to decrease as the horizontal distance between the pillars of the twin tunnel and the vertical distance between the toe of the pile group and the crown of the tunnel were decreased. The impact of the second tunnel on the first tunnel and pile group was decreased as the horizontal distance between the pillars of the twin tunnel was increased. In addition, the vertical distance between the toe of the pile group and the crown of the tunnel had a relatively greater impact on the shear strain results than the horizontal distance of the pillars between the twin tunnels. According to the results of the close-range photogrammetry and numerical analysis, the settlement of adjacent pile group and adjacent ground was measured within the design criteria, but the shear strain of the ground was judged to be outside the range of small strain in all cases and required reinforcement.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association 26(1)59-78(2024) https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.1.059

eISSN: 2287-4747 pISSN: 2233-8292

Received January 8, 2024 Revised January 18, 2024 Accepted January 19, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright C 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Twin tunnel, Pile group, Shear strain, Close-range photogrammetry, Numerical analysis

초 록

현재 터널 시공 시 인접 구조물 및 지반의 침하를 기준으로 안정성을 평가하고 있지만, 지반의 전단변형은 터널 굴착 및 작용하중 변화에 따른 지반의 파괴메커니즘을 결정짓는 주요 인자로서 터널 굴착 시 안정성 검토 및 보강영역 산정에 활 용할 수 있다. 본 연구에서는, 실내모형시험을 통해 도심지 연약지반에 병렬터널 굴착을 모사하여 병렬터널 굴착이 인접 한 군말뚝 기초 및 인접 지반에 미치는 거동에 대해 분석하였다. 실내모형시험 시 근거리 사진계측을 활용하여 지중의 변 위 및 지반의 전단변형을 구하고, 이를 바탕으로 2차원 유한요소 수치해석을 수행하였다. 역해석 결과 병렬터널의 필라 부 수평이격거리 및 군말뚝 기초 선단부와 터널 천단부 사이 수직이격거리가 증가할수록 최대전단변형률이 감소하는 경 향을 보였다. 필라부 수평이격거리가 증가할수록 두 번째 터널에 의해 첫 번째 터널 및 군말뚝 기초에 미치는 영향이 줄 어들었다. 또한, 필라부 수평이격거리보다 군말뚝 기초 선단부와 터널 천단부 사이 수직이격거리가 지반의 전단변형률 결과에 미치는 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 근거리사진계측과 수치해석 결과 인접 군말뚝 및 인접 지반의 침하는 설계 기준 이내로 측정되었으나, 지반의 전단변형률은 모든 Case에서 미소변형 범위를 벗어나 보강이 필요한 것 으로 판단된다.

주요어: 병렬터널, 군말뚝, 전단변형률, 근거리사진계측, 유한요소해석

1. 서 론

일반적으로 도심지 인프라를 위한 사용 가능한 공간의 부족으로 인해 수많은 지하공간 건설 프로젝트가 시행 되었다. 터널과 같이 지하공간 사용을 위한 지하 구조물은 증가하는 교통체증 등을 해결하기 위한 방안으로써, 최 근 우리나라에도 지하도로를 위한 터널 굴착 사례가 증대되었다. 하지만, 도심지의 지중에는 고층 건물의 기초뿐 만 아니라 크고 작은 터널 구조물로 인해 설계 시 인접한 지중구조물의 변형인 안정성을 고려해야 한다. 터널 굴 착에 따른 기존 말뚝 기초의 안정성에 미치는 영향은 기존의 여러 사례를 통해 조사되어 왔다(Lee and Ng, 2005; Zhang et al., 2019a; Hong et al., 2020; Jeon et al., 2020; Wang et al., 2021). Mroueh and Shahrour (2002)는 도 심지의 터널 건설이 인접한 말뚝 기초에 미치는 영향에 대해 3차원 유한요소 모델링을 사용하여 분석하였다. 수 치해석은 단일 말뚝과 군말뚝에 대해 수행되었으며, 그 결과 터널 시공은 인접한 말뚝에 상당한 내부응력을 발생 시켰다. Yang et al. (2011)은 터널 건설이 말뚝 기초에 미치는 영향을 분석하기 위해 체적 손실 효과를 고려하여 DCM을 사용한 유한요소해석을 수행하였다. 원심모형시험을 바탕으로 수치해석을 검증하였고, 영향권 내에서 는 터널링에 따라 말뚝에 인장력과 큰 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, Franza and Marshall (2018)은 다 양한 강성의 알루미늄 말뚝 모델을 사용하여 말뚝 기초 아래 터널 굴착 시 영향을 분석하기 위해 원심모형시험을 수행하였고, 구조물의 중량 및 강성, 터널의 체적 손실률에 따른 구조물 변형에 대해 분석하였다.

또한, 터널 굴착 시 기존 터널에 인접하여 신설 터널이 시공되거나, 필라부 이격거리가 근접한 병렬 터널이 시

공되는 경우도 늘어나고 있는 추세이다. 이에 따라 병렬터널 시공에 따른 인접 지반 및 구조물에 대한 많은 연구 들이 수행되었다(Do et al., 2014; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2019b; Islam and Iskander, 2021; Yun et al., 2022). Fang et al. (2022)은 원심모형시험을 통해 신설 터널이 기존의 상부 터널 두 개에 미치는 영향을 조사하였고, Mirhabibi and Soroush (2012)는 현장 데이터와 ABAQUS 소프트웨어를 활용하여 병렬터널과 지상 건물의 상호작용에 대한 연구를 면밀히 분석하였다.

이처럼 도심지에서 중요한 역할을 하고 있는 터널 굴착 시 인접 지반에 발생하는 변형에 대한 고려는 매우 중요 하다. 지반의 전단변형은 터널굴착 및 작용하중 변화에 따른 지반의 파괴메커니즘을 결정짓는 주요 인자임에도 불구하고, 대부분의 설계 안정성 검토는 터널의 천단 및 내공변위와 인접 구조물의 침하를 기준으로 하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 평면변형률 조건에서 기존 군말뚝 기초 하부에 병렬터널 굴착 시 지반 거동을 전단변형 영 역을 통해 분석하였다. 상사율을 고려한 실내모형시험이 수행되었으며, 이와 동시에 근거리 사진계측이 이루어 졌다. 이를 바탕으로 2차원 유한요소 역해석을 진행하였고, 지반 침하와 전단변형률을 고려하여 실내모형시험과 수치해석 결과를 비교·분석하였다. 실내모형시험과 근거리 사진계측을 활용하여 지반 침하 및 지반의 전단변형 률을 분석하고, 수치해석과의 비교분석을 통한 본 연구의 흐름을 Fig. 1에 도시하였다.



Fig. 1. Flow chart for this study

2. 이론적 배경

Lee and Lee (2012)는 모아의 변형률 원을 이용하여 알려진 지점의 변위를 기준으로 체적변형률(ϵ_v), 최대 전 단변형률($\delta\gamma_{max}$), 팽창각(ψ)을 계산하였다. 모든 변위들은 사진계측 프로그램인 VMS프로그램에 의해 mm 단 위로 측정되었으며, 변형률 계산을 위해 삼각형 요소의 변위는 삼각형 모서리 부분의 변형을 나타내고, 삼각형 요 소의 회전은 고려하지 않았다. Fig. 2에서 변형률(ϵ_{mv})은 다음 식 (1)과 같다.



Fig. 2. Transform triangle elements (Lee and Lee, 2012)

$$\epsilon_{mn} = \frac{mn - mn'}{mn} \tag{1}$$

모아의 변형률원에서 각각의 선에 대한 변형률을 계산하기 위해 Fig. 3(a)의 수평선(reference line)을 기준으



Fig. 3. Using Mohr's strain circle to calculate strain in triangle elements (Lee and Lee, 2012)

로 하는 각도를 고려해야 한다. α는 수평선에서 최대 주변형률(major principal strain, ε₁) 방향까지의 각도이며, Fig. 3(a)의 변수들을 모아의 변형률 원으로 나타내면 Fig. 3(b)와 같다.

Fig. 3(b)로부터 원의 반지름을 나타내는 최대 전단변형률인 δγ_{max}/2를 얻을 수 있으며, 최대 전단변형률을 구하는 과정은 식 (2)~(4)와 같다.

$$\epsilon_{mn} = \frac{\epsilon_v}{2} + \frac{\gamma_{\max}}{2} \left[\cos 2\left(\theta_{mn} - \alpha\right) \right] \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{A \sin M \sin N + B \sin L \sin K}{A \cos M \sin N + B \cos L \sin K} \right]$$
(3)

$$\gamma_{\max} = \frac{\epsilon_{12} - \epsilon_{23}}{\left[\cos 2(\theta_{12} - \alpha) - \cos 2(\theta_{23} - \alpha)\right]} \tag{4}$$

식(1)~(3)을 이용하여 지반의 최대 전단변형률을 정리하면, 다음과 같다.

$$\gamma_{\max} = \frac{\epsilon_{\theta}}{2} = \frac{(1-\nu^2)\sigma_{\theta}/E + \nu\sigma_{\theta}(1+\nu)}{2} = \frac{\epsilon_{\theta}}{2(1-\nu)} = \frac{\epsilon_{\max}}{2(1-\nu)}$$
(5)

본 절에 작성된 전단변형률에 대한 이론적 배경은 4절의 근거리 사진계측 시 참고하였다. 또한, 전단변형은 변 형률의 크기에 따라 미소변형, 소변형, 중변형, 대변형으로 구분하고, 미소변형의 경우 지반재료가 탄성 범위에 속한다고 판단하여 보강이 불필요한 영역으로 간주된다. 전단변형을 고려한 터널 설계는 인접 지반 및 구조물의 안정성을 전체적으로 고려할 수 있으며, 전단변형 영역은 보강영역과 유사하여 터널 굴착 시 고려해야할 주요 인 자이다.

3. 실내모형시험

3.1 개요

본 연구를 수행하기 위해 2차원 평면변형률 조건의 터널 직경(D)을 기준으로 1/100 상사율을 고려한 실내모형 실험을 수행하였다. 1,500 mm × 700 mm × 100 mm 크기의 모형토조는 지반의 변형을 근거리사진계측을 통해 확인 및 촬영할 수 있도록 전후면을 아크릴판으로 제작되었다. 병렬터널 굴착을 모사하기 위해 직경 100 mm의 모형 터널에 멤브레인을 결합하여 사용하였다. Potts and Zdravkovic (2001)은 열을 이루는 말뚝 간격이 가까운 경우 평면변형률 조건에서 원형 단면과 등가물성을 갖는 2차원단면으로 치환할 수 있다고 하였다. 따라서, 모형 군말뚝 기초는 Fig. 4와 같이 제작되었으며, 말뚝에 재하되는 하중의 편심을 방지하기 위한 말뚝 머리(pile cap)는 raft 효과를 고려하지 않기 위해 지표면에서 일정 거리를 두고 설치하였다. 터널 굴착을 모사하기 위해 체적손실 률(Volume loss)을 개념을 적용하였으며, Kong et al. (2016)을 참고하여 모형 터널 내부의 수량을 조절하여 터널 굴착을 모사하였다. 모형 말뚝의 허용하중 산정을 위해 LCM (Load Control Method) 기반의 정재하시험을 수행 하였고, 하중에 따른 말뚝의 침하량을 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)로부터 측정하여 하중-침하 관계곡선(P-S curve, Fig. 5)을 나타낸 후 산정하였다.



Fig. 5. P-S curve for LCM

모래강사장치를 사용하여 균질한 사질토 지반을 조성하였고, Kim et al. (2012)을 참고하여 토조 하단부로부 터 250 mm 간격으로 함수비 캔을 설치한 후 사질토 지반의 상대밀도를 산출하였다. 평균 33.5%의 상대밀도로 형성된 지반은 사질토 지반의 상대밀도에 따른 흙의 분류 기준(Das, 2011)에 따라서 느슨한 정도의 지반으로 분 류하였다. Fig. 6과 같이 총 3가지 케이스로 나누어 실내모형시험을 진행하였으며, 지표의 침하는 LVDT를 설치 하여 측정하였다.



Fig. 6. Schematic diagram of laboratory model test

3.2 결과

실내모형시험을 통해 군말뚝 두부의 침하를 LVDT로 측정한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 먼저 일반적인 연약지 반 체적손실률인 1.5%를 적용하여 1st 터널의 굴착을 모사하였고, 이후 2nd 터널 굴착의 경우 체적손실률을 1.5%, 3%, 5%, 10% 18%로 5단계에 거쳐 파괴를 모사하였다. 그 중 수치해석 시 역해석 바탕으로 활용될 1.5% 의 체적손실률의 경우에만 결과를 언급하려고 한다. 본 절에서는 병렬 터널 굴착 시 가장 큰 영향을 보이는 L₂ 및 L₃에서의 침하 결과만 분석하고, 다음 절에서 근거리사진계측을 통한 전단변형 결과를 분석한다.

Fig. 7에서 첫 번째 터널 굴착 시 말뚝 두부(L₂)에서 발생한 침하는 각 케이스 별로 0.261 mm, 0.196 mm, 0.102 mm로 발생하였다. 마찬가지로, 두 번째 터널 굴착 시 Case I 이 0.69 mm로 가장 크게 발생하였으며, Case II 와 Case II 에서는 각각 0.53 mm와 0.266 mm가 발생하였다. 대체적으로 터널 간 이격거리가 멀어질수록 침하가 적 게 발생하는 경향을 보였다. Case I 은 Case II 및 Case II 보다 각각 1.3배, 2.6배 크게 발생한 것으로 나타났다.



Fig. 7. Pile cap settlements for laboratory model test

4. 근거리 사진계측

4.1 개요

지반공학에서는 경우에 따라 계측기를 사용하여 지반의 거동을 측정하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복 하기 위해 근거리 사진계측기법(Close range photogrammetry)이 지반의 거동을 분석하는 방법으로 활용되고 있 다. No-target 프로그램은 실내모형시험 수행 시 단계마다 모래(피사체)를 촬영한 사진으로부터 지반 변위 데이 터를 얻는 과정과 이를 시각화 하는 과정을 MATLAB 프로그램 하나로 통합한 프로그램이다. 지반의 변형을 변위 벡터로 나타내는 방법인 VMS (Vision Measurement System) 프로그램의 단점을 보완하고자 개발된 No-target 프로그램의 수행절차는 Lee et al. (2019)에 의해 정립되었으며, 전단변형률 계산절차는 Kong (2020)을 참고하 였다. 기존의 No-target 프로그램은 시각화를 위해 실내모형시험 수행 시 촬영한 변형 전과 변형 후에서의 촬영 사진이 각각 1장씩 이용되며, 각 Case에 대해 주문진 표준사와 검은 모래를 이용하여 시험을 실시하고 촬영된 사 진들을 기반으로 No-target 프로그램의 결과를 분석하였다. Fig. 8과 같은 수행절차로 근거리 사진계측을 수행하 였다. 이미지 프로세싱 과정은 실내모형시험에서 터널 굴착 전(변형 전)과 굴착 후(변형 후)의 사진을 촬영하여, 검은 모래의 초기 좌표값(x, y)에 대해 이동 후 좌표값을 찾는 과정이다. MATLAB을 통해 두 사진의 검은 모래 입자의 cross-correlation을 분석하여 변위 벡터를 도출한다. 이 때, MATLAB을 이용한 컨트롤 포인트 좌표는 이 미지 데이터 자체의 사진좌표(photo coordinate)이다.



Fig. 8. Procedure of no-target program (Kong, 2020)

4.2 결과

Fig. 9에 촬영된 토조에서 분석에 사용한 영역을 나타냈고, Fig. 10은 근거리 사진계측 시 각 케이스에 따른 지 반 변위 분포에 대한 컨투어를 나타내고 있다. 병렬터널 간 수평이격거리가 증가함에 따라 병렬터널 굴착에 의한 지반 변위는 감소하였으며, 두 번째 터널 굴착으로 인한 영향이 Case I 의 군말뚝 기초 인접 지반에서 가장 크게 발생하였다. Case Ⅲ에서는 LVDT로 측정한 군말뚝 두부 침하(0.266 mm)에 비하여 군말뚝 기초에 인접한 지반 의 침하(0.45~0.50 mm)가 더 크게 발생하였다.



Fig. 9. Analysis area of no-target program



Fig. 10. Ground deformation contours of no-target program

근거리 사진계측 시 각 케이스에 따른 지반의 전단변형률에 대한 결과는 Fig. 11에 정리하였다. 각 케이스에 따 라 발생한 지반의 최대 전단변형률은 각각 0.046, 0.026, 0.025로 나타났으며, 첫 번째 터널에서 군말뚝 기초 인접 지반으로 영향권을 형성하는 것으로 나타났다. 색상 범례 중 진한 파랑색의 경우 미소변형에 가까운 결과를 의미 하며, 병렬터널의 필라부 이격거리가 근접할수록 빨간색 컨투어를 통해 전단변형에 따른 전단파괴양상이 뚜렷한 것을 알 수 있다. 각 케이스의 최대 전단변형률은 모두 10⁻⁶ 이상으로 미소변형률의 범위를 초과하여 지반 재료가 탄성 범위를 벗어난 것으로 간주되며, 보강이 필요할 것으로 예상된다.



Fig. 11. Shear strain of ground of no-target program

실내모형시험 및 근거리 사진계측 결과, 병렬터널의 필라부 이격거리가 감소할수록 군말뚝 및 지중 변위, 지반 의 최대 전단변형률은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 병렬터널 굴착시 필라부의 소성영역이 중첩됨에 따 라 소성영역이 확대되어 나타난 결과로 판단된다.

5. 수치해석

본 절에서는 수치해석 모델링을 통한 지반의 침하 및 전단변형률 결과에 대해 다루고자 한다. 수치해석은 유한 요소법 기반의 수치해석프로그램인 PLAXIS 2D를 이용하였으며, Fig. 1과 같이 실내모형시험 결과를 바탕으로 역해석을 수행하였다. 역해석은 계측 결과를 이용하여 모델링 파라미터 및 수치해석 모델의 적정성을 평가하는 데 유용하다(Shin, 2015). 본 연구에서는 실내모형시험의 계측치를 기반으로 정해석 지배방정식을 역으로 전개 하여 대상 지반의 설계파라미터를 구할 때 주로 이용되는 역산법(Inverse method)을 활용하였으며, 역산법을 이 용한 강도정수의 산정 절차는 Fig. 12와 같다.



Fig. 12. Steps for construction associated with numerical analysis

5.1 개요

유한요소 수치해석 모델링을 위해 지반에는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 군말뚝 기초는 선형 탄성 (Linear elastic) 모델을 적용하였다. 지반의 탄성계수는 지반의 상대밀도를 기준으로 분류하여 초기 물성치를 선 정하고, 실내모형시험 결과를 바탕으로 역해석을 진행하였으며 자세한 수치해석 절차는 Fig. 13과 같다. 역해석 을 통해 지반과 말뚝에 적용한 물성치와 단위는 Table 1에 정리하였다. 지반과 구조물 간의 미끄러짐을 모사하기 위해 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값을 사용하여 인터페이스 요소를 모사하였다. 수치해석은 굴착, 말뚝 시공, 말뚝 하중 재하, 1st 터널 굴착, 1st 터널 시공 완료, 2nd 터널 굴착의 절차를 고려하여 시뮬레이션하였다. 본 연구는 도 심지에 이미 존재하고 있는 건물 기초 하부에 굴착하는 병렬터널로 인한 지반 거동에 초점을 두고 있으므로 시공 단계의 순서에 의한 영향은 고려하지 않았다. 수치해석 케이스는 Table 2와 같이 모델링 되었으며, 실내모형시험 케이스와 함께 수직이격거리에 대해 추가적으로 수치해석을 수행하였다. Case C에 대한 mesh generation을 Fig. 14에 나타내었다.



Fig. 13. Steps for construction associated with numerical analysis

Symbol	Material	Unit	Value	
			Loose sand	Pile
γ	Unit weight	kN/m ³	14.14	-
Е	Young's modulus	kPa	22,150	2.45×10^{6}
υ	Poisson's ratio	-	0.34	0.25
с	Cohesion	kPa	0	-
φ	Shear resistance angle	° (deg)	30	-
ψ	Dilatancy angle	° (deg)	0	-
-	R _{inter}	-	0.8	-

Case		Vertical offset Horizontal offset	
Case A	Ι		1.0D
	I	0.5D	1.75D
	Ш		2.5D
Case B	Ι		1.0D
	I	1.0D	1.75D
	Ш		2.5D
Case C	Ι		1.0D
	I	1.5D	1.75D
	III		2.5D

Table 2. Cases for numerical analysis





5.2 결과

병렬터널 굴착에 의한 주변지반의 거동을 분석하기 위해 역해석을 통해 나타난 연직변위의 분포를 Fig. 15에 컨투어로 나타냈다. Case I에서는 터널 간 필라부 이격거리가 충분하지 않아 병렬터널 굴착이 군말뚝 기초와 첫 번째 터널 천단부에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 또한, 수평이격거리가 확보될수록 군말뚝 기초에 집중된 변 위는 감소하고, 병렬터널의 상부지반에 변위가 발생하는 경향이 나타났다. Case A-I에서 두 번째 병렬터널 굴착 에 의해 군말뚝 기초 인접 지반에 미치는 영향이 가장 크게 발생하였으며, 수직 및 수평이격거리가 증가할수록 군 말뚝 기초 인접 지반에 미치는 영향은 점점 감소하였다.



Fig. 15. Ground deformation contours of numerical analysis (Case C)

전체 케이스에 대한 군말뚝 두부 및 지표 침하 결과를 Fig. 16에 나타냈으며, 수직 및 수평이격거리가 증가함에 따라 군말뚝 기초의 침하가 감소하는 경향을 보이고 있다. 군말뚝 기초의 침하는 수평이격거리가 증가할수록 최소 0.009%, 최대 0.313% 감소하였으며, 수직이격거리가 증가할수록 최소 0.033%, 최대 0.119% 감소하였다. 두 번째 터널 직상부 지표 침하는 수평이격거리가 증가할수록 최소 0.002%, 최대 0.142% 감소하였으며, 수직이격 거리가 증가할수록 최소 0.002%, 치대 0.142% 감소하였으며, 수직이격 거리가 증가할수록 최소 0.002%, 치대 0.142% 감소하였으며, 수직이격 거리가 증가할수록 최소 0.011%, 최대 0.142% 감소하였다. 군말뚝 기초의 경우 수평이격거리의 영향이 약 0.72 배 크게 작용하였고, 두 번째 터널 직상부 지표 침하의 경우 수직이격거리의 영향이 약 12.26배 크게 작용하였다.



Fig. 16. Pile cap settlement for numerical analysis

Case C에 대한 지반의 전단변형률 결과를 Figs. 17~19에 나타냈으며, 수평이격거리가 증가함에 따라 첫 번째 터널 및 군말뚝 기초에 대한 두 번째 터널 굴착으로 인한 영향이 감소하는 것을 알 수 있다. 최대전단변형률은 Fig. 17의 Case A- I 에서 0.037로 가장 크게 발생하였으며, 첫 번째 터널 좌측 벽부에서 지표를 향하는 영향선에서 발 생하였다. Case C-II에서 최대전단변형률은 0.019로 가장 작게 발생하였으며, 우측 벽부에서 지표를 향하는 영 향선에서 발생하였다(Fig. 19). Case A (Fig. 17)의 경우, 군말뚝 기초와 첫 번째 터널 간 수직이격거리가 충분하 지 못하여 Case B와 Case C에 비해 첫 번째 터널 인접 지반의 전단변형으로 인한 영향선이 두드러지게 나타났다. 수평이격거리가 증가할수록 지반의 최대전단변형률은 최소 0.06%, 최대 0.18% 감소하였으며, 수직이격거리가 증가할수록 지반의 최대전단변형률은 최소 0.04%, 최대 0.27% 감소한 것으로 나타났다. 지반의 최대전단변형률 에 미치는 영향은 수평이격거리보다 수직이격거리가 약 1.46배 크게 작용한 것으로 나타났다.



Fig. 17. Shear strain of ground of numerical analysis (Case A)



Fig. 18. Shear strain of ground of numerical analysis (Case B)



6. 결 론

본 연구는 기존의 군말뚝 기초 아래 병렬터널 굴착 시 발생하는 기초-지반의 상호거동을 실내모형시험, 근거리 사진계측 및 수치해석을 통하여 분석하였다. 병렬터널 굴착에 따른 군말뚝 기초 및 인접 지반의 침하, 지반의 전 단변형률을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 실내모형시험을 통해 느슨한 사질토 지반에 설치된 군말뚝 기초 아래 병렬터널이 굴착될 경우, 병렬터널의 필 라부 수평이격거리가 멀어질수록 침하량은 감소하는 경향을 보였다. 병렬터널의 수평이격거리가 감소함에 따라 군말뚝 침하는 1.3배 및 2.6배 크게 발생하였다.
- 2. 수치해석 결과 병렬터널의 필라부 수평이격거리가 증가할수록 군말뚝 기초의 경우 침하량이 최소 0.009%, 최 대 0.313% 감소하였으며, 두 번째 터널 직상부 지표 침하의 경우 최소 0.002%, 최대 0.142% 감소하였다. 군 말뚝 기초 선단부와 터널 천단부 사이 수직이격거리가 증가할수록 군말뚝 기초의 경우 침하량이 최소 0.033%, 최대 0.119% 감소하였으며, 두 번째 터널 직상부 지표 침하의 경우 최소 0.011%, 최대 0.142% 감소 하였다.
- 3. 모형시험 및 수치해석 모두 터널-터널 및 터널-말뚝의 이격거리가 근접함에 따라 뚜렷한 전단파괴양상을 보였으며, 터널-터널 이격거리보다 터널-말뚝 이격거리가 지반의 전단변형률 결과에 미치는 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 따라서, 병렬터널 시공시 병렬터널 필라부 및 기초-터널 간의 충분한 이격거리 확보가 필요할 것으로 보인다.
- 실내모형시험 및 근거리사진계측, 수치해석 결과를 종합하여 분석하면 지중 변위는 침하 기준(25.4 mm)을 초 과하지 않아 안정성 판단 시 안정할 것으로 예측하였다. 하지만, 지반의 전단변형률은 모든 Case에서 미소변 형 범위를 벗어났으며, 보강이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2 C2013162).

저자 기여도

김수빈은 연구개념 설계, 데이터 수집 및 분석, 원고작성을 하였고, 오영석은 참고문헌 조사, 데이터 분석 및 원 고 검토를 하였고, 이용주는 연구개념 설계 및 원고 검토를 하였다.

References

- 1. Das, B.M. (2011), Principles of Foundation Engineering, Cengage Learning, Boston, Massachusetts, USA, pp. 10-15.
- Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I. (2014), "Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 42, pp. 40-51.
- 3. Fang, Q., Liu, X., Zeng, K., Zhang, X., Zhou, M., Du, J. (2022), "Centrifuge modelling of tunnelling below existing twin tunnels with different types of support", Underground Space, Vol. 7, No. 6, pp. 1125-1138.
- 4. Franza, A., Marshall, A.M. (2018), "Centrifuge modeling study of the response of piled structures to tunneling", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 144, No. 2, 04017109.
- Hong, S.K., Oh, D.W., Kong, S.M., Lee, Y.J. (2020), "Investigation of divergence tunnel excavation according to horizontal offsets between tunnels", Geomechanics and Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 111-122.
- 6. Islam, M.S., Iskander, M. (2021), "Twin tunnelling induced ground settlements: A review", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 110, 103614.
- Jeon, Y.J., Jeon, S.C., Jeon, S.J., Lee, C.J. (2020), "A study on the behaviour of pre-existing single piles to adjacent shield TBM tunnelling from three-dimensional finite element analyses", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 22, No. 1, pp. 23-46.
- Kim, Y.S., Ko, H.W., Kim, J.H., Lee, J.G. (2012), "Dynamic deformation characteristics of Joomunjin standard sand using cyclic triaxial test", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 12, pp. 53-64.
- 9. Kong, S.M. (2020), Effect of pile installation on behaviour of existing tunnel and surrounding ground using model test and close range photogrammetry, Ph.D. Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 57-79.
- 10. Kong, S.M., Oh, D.W., Ahn, H.Y., Lee, H.G., Lee, Y.J. (2016), "Investigation of ground behaviour between plane-strain grouped pile and 2-arch tunnel station excavation", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 6, pp. 535-544.
- 11. Lee, G.T.K., Ng, C.W.W. (2005), "Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 2, pp. 193-201.
- 12. Lee, J.H., Lee, C.N., Lee, Y.J. (2019), "Measurement of ground behaviour due to tunnelling using No-target program in laboratory model test", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 3, pp. 397-418.
- 13. Lee, Y.J., Lee, J.H. (2012), "Calculation of strain in triangular elements using Mohr's strain circle", Geotechnical Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 25-28.
- 14. Mirhabibi, A., Soroush, A. (2012), "Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 29, pp. 40-51.
- 15. Mroueh, H., Shahrour, I. (2002), "Three-dimensional finite element analysis of the interaction between

tunneling and pile foundations", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 26, No. 3, pp. 217-230.

- Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2001), Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application, Thomas Telford, London, UK.
- 17. Shin, J.H. (2015), Geomechanics & Engineering: Behavior and Modeling, CIR, Seoul, pp. 571-608.
- Wang, Y., Liu, J., Guo, P., Zhang, W., Lin, H., Zhao, Y., Ou, Q. (2021), "Simplified analytical solutions for tunnel settlement induced by axially loading single pile and pile group", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 147, No. 12, 04021116.
- 19. Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., Wei, G. (2019), "Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 83, pp. 520-532.
- 20. Yang, M., Sun, Q., Li, W.C., Ma, K. (2011), "Three-dimensional finite element analysis on effects of tunnel construction on nearby pile foundation", Journal of Central South University, Vol. 18, pp. 909-916.
- Yun, J.S., Kim, H.E., Nam, K.M., Jung, Y.R., Cho, J.E., Yoo, H.K. (2022), "Analysis of the influence of existing parallel tunnels according to the location of the new tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 24, No. 2, pp. 193-215.
- 22. Zhang, T., Taylor, R.N., Divall, S., Zheng, G., Sun, J., Stallebrass, S.E., Goodey, R.J. (2019a), "Explanation for twin tunnelling-induced surface settlements by changes in soil stiffness on account of stress history", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 85, pp. 160-169.
- Zhang, Z., Zhang, C., Jiang, K., Wang, Z., Jiang, Y., Zhao, Q., Lu, M. (2019b), "Analytical prediction for tunnel-soil-pile interaction mechanics based on Kerr foundation model", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 23, pp. 2756-2771.