

기존터널 상부지반 굴착 후 구조물 설치에 따른 터널거동에 관한 실험적 연구

차석규¹ · 이상덕^{2*}

¹정회원, 아주대학교 대학원 건설시스템공학과 박사과정

²정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수

Experimental study on the tunnel behavior induced by the excavation and the structure construction above existing tunnel

Seok-Kyu Cha¹ · Sangduk Lee^{2*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil System Engineering, Ajou University

²Prof. Dr-Ing., Dept. of Civil System Engineering, Ajou University

*Corresponding Author : lsangduk@ajou.ac.kr

Abstract

Recently, the construction of the urban area has been rapidly increasing, and the excavation work of the ground has been frequently performed at the upper part of the existing underground structures. Especially, when the structure is constructed after the excavation of the ground, the loading and unloading process in the ground under the excavation basement can affect the existing underground structures. Therefore, in order to maintain the stability of the existing underground structure due to the excavation of the ground, it is necessary to accurately grasp the influence of the excavation and the structure load in the adjoining part. In this study, the effect of the excavation of the ground and the new structure load on the existing tunnel was experimentally implemented and the influence of the adjacent construction on the existing tunnel was investigated. For this purpose a large testing model with 1/5 scale of the actual size was manufactured. The influence of ground excavation, width of the load due to new structure, and distance between centers of tunnel and of excavation on the existing tunnel was investigated. In this study, it was confirmed that the influence on the existing tunnel gets larger, as the excavation depth get deeper. At the same distance, it was confirmed that the tunnel displacement increased up to three times according to the increase of the building load width. That is, the load width influences the existing tunnel larger than the excavation depth. As the impact of the distance between centers of tunnel and of excavation, it was confirmed that tunnel crown displacement decreased by 48%. The result showed that a tunnel is located in the range of 1D (D: tunnel diameter) from the center of excavation, the effect of excavation is the largest.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(3)640-655(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.3.640>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 20, 2018

Revised April 24, 2018

Accepted May 3, 2018



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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kct.go.kr

Keywords: Existing tunnel, Load width, Influence distance, Structure load, Test model

초 록

최근 도심지 공사가 급증하여 기존 지하구조물의 상부에서 지반굴착 공사가 빈번하게 이루어지고 있다. 특히 지반굴착 후 구조물이 시공되는 경우 굴착 저면 하부 지반 내에서 하중 제거, 재하 과정이 반복되므로 기존 지하구조물에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지반굴착으로 인한 기존 지하구조물의 안정을 유지하기 위해서는 인접부에서의 굴착 및 구조물 하중에 의한 영향을 정확히 파악해야 한다. 본 연구에서는 기존터널 상부에 지반 굴착 및 신규 구조물 하중이 가해지는 경우를 실험적으로 구현하여 인접시공이 기존 터널에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 실제 크기의 1/5로 축소된 대형모형시험기를 제작하여 굴착저면과 터널 천단 간의 거리를 일정하게 유지한 채 지반굴착, 구조물 하중의 폭, 기존 터널 중심과 지반 굴착 저면 중심과의 이격거리에 따른 영향을 파악하였다. 연구 결과, 동일 하중 크기에 대하여 굴착 깊이가 깊어질수록 기존 터널에 더 큰 영향을 작용하는 것을 확인하였다. 동일 이격거리에서 기존 터널에 영향은 건물하중 폭 증가에 따라 터널 내공변위가 최대 3배까지 증가하는 것을 확인하였다. 건물하중 폭의 영향이 굴착 깊이보다 더 크게 나타났다. 또한 수평으로 이격하는 경우는 터널 중심에서 1.0D 이격되면 터널 천단변위가 48% 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 기존 터널 상부에 터파기 시공 위치에 따른 영향이 가장 크게 발생하는 위치는 1.0D (D: 터널직경)인 것으로 확인하였다.

주요어: 기존터널, 하중폭, 구조물하중, 영향범위, 모형시험

1. 서론

최근 도심지의 급격한 발달로 인해 지하공간의 개발이 확대되고, 기존 구조물에 근접한 굴착공사가 급증하고 있다. 도심지에 수행되는 대규모 터파기 공사는 굴착심도가 깊을 뿐만 아니라 지하철 터널 및 매설물 등의 하부 구조물에 인접하여 시공되는 경우가 빈번하다. 이러한 근접 공사 시에는 기존 구조물과의 신규 구조물 상호 간의 영향을 미치게 되며, 이러한 상호작용은 이격거리에 따라 그 정도가 차이가 있으며, 이격거리에 따라 기존 및 신규 구조물의 안전성 문제로 대두될 수 있다. 따라서 기존 터널에 인접하여 지반 굴착 또는 신규 구조물이 시공되는 경우 이격거리 및 작용하중에 관한 상관관계를 정확히 파악하여야 기존 터널에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 인접굴착에 따른 기존 터널의 거동에 대한 연구로는 기존 터널에 근접하여 하부에 신설터널 굴착에 따른 거동에 관한 연구(Kim, 2005), 기존 터널에 근접한 흙막이 굴착에 대한 안정성 연구(Kim and Lee, 2007), 구조물 시공 시 보강 범위에 관한 연구(Lee et al., 2009)나, 터널과 구조물간의 상호거동특성에 초점을 맞추거나(Kim et al., 1999; Morton and King, 1979; Jacobsz et al., 2001; Hergaden et al., 1996), 굴착으로 인한 기존 구조물의 피해등급 산정에 관한 연구 및 기준(Burland, 1995; Boscardin and Cording, 1989; Son and Cording 2005; Seoulmetro, 2001) 이나 시공 사례를 분석한 경우가 대부분이다. 그러나 기존 터널 상부를 굴착하고 구조물 신설에 따른 추가 하중에 대한 기존 터널의 거동에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 터널을 1/5로 축소한 모형터널을 설치하고, 터널의 직상부 및 터널의 좌우측에 걸쳐 지상 11층, 지하 1~3층 규모의 신축건물이 들어서는 경우를 모사한 대형모형시험을 수행하였다. 이를 통해 터널상부 터파기 공사에 따라 발생하는 터널의 변형거동과, 터파기 공사 완료 후 신축구조물의 시공에 따른 터널의 거동을 파악하고자 하였다.

기존터널 상부지반의 굴착 중심과 터널 중심 간의 거리(0.0D~1.0D 여기서, D는 터널 직경)와 상부 이격거리 (5~15 m) 및 건물하중 등을 변화시켜 수행한 대형 토조시험 결과로부터 굴착지면과 터널과의 거리 및 건물하중 변화에 따른 지반의 거동과 터널의 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 모형시험 개요

본 연구는 터널상부 지반에서 지하 굴착 공사로 인한 하부지반 내 지중 응력 삼로 및 굴착 공사 후 신축구조물 시공에 따른 하부 지반 내 응력 증가로 인한 기존 터널의 거동을 파악하는데 목적이 있으며, 이를 위해 실제 터널 크기의 1/5 축척의 대형모형시험을 수행하였다.

2.1 개요

대형 모형시험은 터널을 매설하고 그 위에 하중 재하를 할 수 있도록 폭 2.0 m, 길이 4.0 m, 높이 6.0 m 크기의 토조를 제작하였다. 모형지반은 모래로 이용하여 모형 터널 상부로 일정한 토피고를 가지도록 조성하였다. 모형 지반 조성 후 일정 토피고, 즉 굴착깊이에 해당하는 등분포하중을 재하하였다. 지반 굴착은 소정의 위치에서 재하된 하중을 제거하는 방법으로 구현하였으며, 하중이 제거된 위치에 다시 하중을 재하하여 구조물 시공에 따른 하중 증가를 모사하였다.

2.2 모형 지반의 특성

대형모형시험은 습윤상태의 모래를 사용하여 균질하고 등방성인 모형지반을 조성하여 수행하였다. 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 토조 바닥으로부터 습윤 상태의 모래를 30 cm씩 단계적으로 포설하고 진동기로 층별 다짐하여 시험지반을 조성하였다.

Table 1. Results of laboratory tests of the soil

Particle size distribution	Maximum dry unit weight (γ_{dmax} , kN/m ³)	Minimum dry unit weight (γ_{dmin} , kN/m ³)	Unit weight (γ_d)	Relative density (D_r , %)	Specific gravity (G_s)	Internal friction angle (ϕ , °)	Cohesion (kPa)
$C_u = 2.68$ $C_c = 0.69$ SP	16.86	13.82	15.39	56	2.63	38	6.0

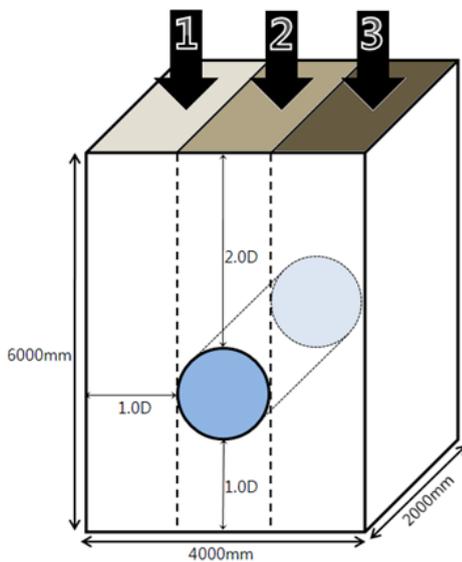
대형모형시험에 사용된 모래지반의 물리적 성질은 입도분포시험, 비중시험, 현장 단위중량시험, 함수량시험을 실시하여 확인하였다. 시험지반을 통일분류법에 의해 분류하면 미세입자가 적으며 입도분포가 균등하고 불량한 모래(SP)로 나타났다. 지반의 강도정수는 모형지반과 동일한 상대밀도와 함수비를 가진 공시체를 제작 후 직접전단시험을 이용하여 도출하였으며, 도출된 내부마찰각과 점착력은 각각 38.0° 와 6.0 kN/m^2 이다. 모형지반의 물리 역학적 특성은 Table 1과 같다.

2.3 대형모형시험 장치

대형 토조의 크기는 폭 2.0 m, 길이 4.0 m, 높이 6.0 m이다(Fig. 1). 터널 인버트 높이에 해당하는 위치까지 모형 지반을 조성한 후 모형터널을 거치, 모형 터널 천단에서 소정의 위치까지 모형지반을 조성할 수 있도록 제작하였다.

지표면에서 하중을 가할 수 있도록 제작하여 지반굴착깊이에 해당하는 토피 하중 및 건물 하중을 단계별로 재하할 수 있도록 하였다.

대형 토조의 바닥은 파일 기초 후 상부에 콘크리트 슬라브를 타설하여 제작하였고, 우면 벽체와 전후면 벽체 또한 강성이 큰 철근 콘크리트로 제작하여 모형지반의 자중 및 재하하중에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 또한 좌측 벽체는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 것처럼 I형 벽체를 격자로 설치하여 변형이 발생하지 않도록 하였다. 또한 대형 토조의 벽체에 벤토나이트를 도포하고 그리스를 바른 비닐을 부착하여 모형 토조 벽체와 모형 지반 사이의 마찰을 최소화하여 상호 간의 간섭을 억제하였다.



(a) Dimension of test box



(b) The picture of large model test

Fig. 1. Schematic description of large model test

대형모형시험에 사용된 모형 터널의 크기는 길이(L)에 대한 대응비를 사용하여 실제 터널의 크기로부터 1/5 축적의 모형터널을 제작하였고, 모형 터널라이닝의 두께는 지반과 터널 라이닝 사이의 강성비(α)를 사용하여 결정하였다.

$$\text{길이: } \frac{L_m}{L_p}, \text{ 면적: } \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2, \text{ 체적: } \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 \quad (1)$$

본 연구에서는 지반과 터널라이닝 사이의 강성비(α)를 이용하여 Duddeck and Erdmann (1985)가 제안한 방법으로 모형터널라이닝의 제원을 결정하였다.

실제 연구대상 터널과 모형시험에 사용한 터널의 강성비는 각각의 지반 강성 및 터널라이닝 제원에 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{실제 연구대상 터널 강성비: } \alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} \quad (2)$$

$$\text{모형 터널 강성비: } \alpha = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} I_{bm}}$$

여기서, $E_k (E_{km})$: 실제(모형)지반의 탄성계수(kN/m²)

$R (R_m)$: 실제(모형)터널 반경(m)

$E (E_{bm})$: 실제(모형)라이닝 탄성계수(kN/m²)

$I (I_{bm})$: 실제(모형)라이닝의 단위길이당 단면2차모멘트

$t (t_m)$: 실제(모형) 터널 라이닝 두께(m)

모형 터널 라이닝 두께는 연구대상 터널과 모형 터널의 상대강성을 같게하는 방법(Soliman et al., 1993)으로 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$\alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b} = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} I_{bm}} = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} \frac{bt_m^3}{12}} \quad (3)$$

$$t_m = \frac{12 E_{km} R_m^3}{\alpha b_m}$$

본 연구에서는 축소율 1/5인 대형모형시험을 수행하였으며, 연구대상의 기존 터널라이닝의 재질은 콘크리트이며, 단위중량은 25.0 kN/m^3 이고, 이 때 사용한 모형 터널라이닝(Fig. 2)의 재질은 강판으로 단위중량은 문헌값인 78.0 kN/m^3 으로 적용하여 축소율을 산정하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.



Fig. 2. Model tunnel

Table 2. Relative stiffness

Category	Young's modulus (MPa)	Width (m)	Thickness (m)	Relative stiffness (α)
Prototype lining	20,000	1.0	0.3	-
Model lining	200,000	1.0	0.006	1.920

대형모형시험에서는 터널 상부 지반을 굴착하고 시공하는 신축구조물 시공 시 기존 터널, 터널 주변지반 및 지표침하의 역학적 거동을 분석하기 위하여 터널 내부에 변위계 및 Strain gauge를 설치하고, 각각의 지정된 위치에 계측기를 설치하였고(Fig. 3), 계측선을 Data logger에 연결하여 30분 간격으로 자동 계측되어 컴퓨터에 저장되도록 하였다(Table 3).

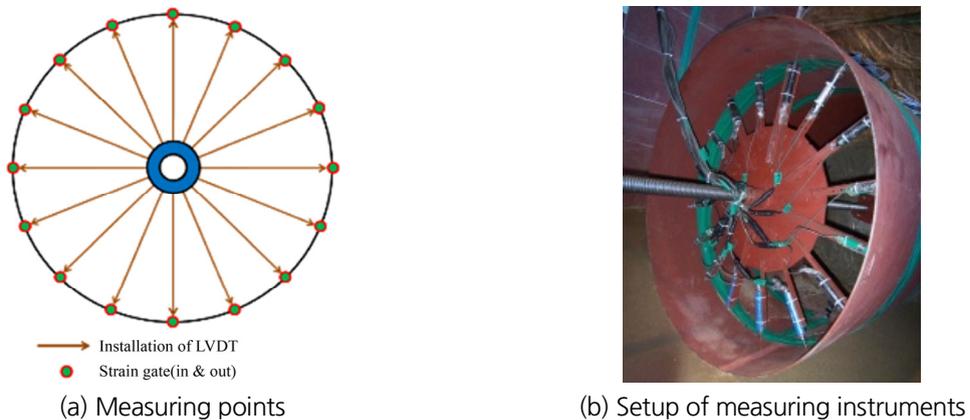


Fig. 3. Measuring instruments of the model tunnel

Table 3. Measuring instruments and objects

Category	Object
Data logger	Data collection
LVDT	Tunnel displacement (16 EA)
Strain gauge	Tunnel moment and axial force measurement (32 EA)

2.4 대형모형시험 방법 및 실험 종류

터널상부 지반굴착 및 축 구조물 시공에 따른 기존 터널의 역학적 거동을 파악하기 위해 총 15 Cases의 시험을 수행하였으며, 시험 조건에 따라서 크게 3가지로 구분하였다.

첫째 터널 직경을 기준으로 하중의 폭을 1.0D, 2.0D, 3.0D로 변화시키면서 수행한 시험에서 터널의 천단부가 굴착 저면의 중심이 되도록 하였고, 각각의 경우마다 굴착깊이를 5 m, 10 m, 15 m로 변화시키면서 총 9 Case를 수행하였다. 둘째 터널 직경을 기준으로 하중의 폭은 1.0D로 하며, 굴착저면 중심부 위치가 터널 천단부를 기준으로 좌우측으로 0.5D, 1.0D로 이동하였을 경우로 각각의 경우마다 굴착깊이를 5 m, 10 m, 15 m로 변화시키면서 총 6 Case를 수행하였다(Table 4). 굴착 하중은 42~126 kPa를 적용하였고, 건물하중은 1층당 15 kPa을 기준으로 총 165 kPa의 하중을 적용하였다. 하중재하도 위치는 Fig. 4와 같고, 재하장치는 Fig. 5와 같다.

Table 4. Cases of model tests

Category	Test case	Loading position	Loading width
Case 1	1-1	Excavation 5 m, Load 11 story	5~8
	1-2	Excavation 10 m, Load 11 story	5~8
	1-3	Excavation 15 m, Load 11 story	5~8
Case 2	2-1	Excavation 5 m, Load 11 story	3~10
	2-2	Excavation 10m, Load 11story	3~10
	2-3	Excavation 15m, Load 11story	3~10
Case 3	3-1	Excavation 5m, Load 11story	1~12
	3-2	Excavation 10m, Load 11story	1~12
	3-3	Excavation 15m, Load 11story	1~12
Case 4	4-1	Excavation 5m, Load 11story	3~6
	4-2	Excavation 10m, Load 11story	3~6
	4-3	Excavation 15m, Load 11story	3~6
Case 5	5-1	Excavation 5m, Load 11story	9~12
	5-2	Excavation 10m, Load 11story	9~12
	5-3	Excavation 15m, Load 11story	9~12

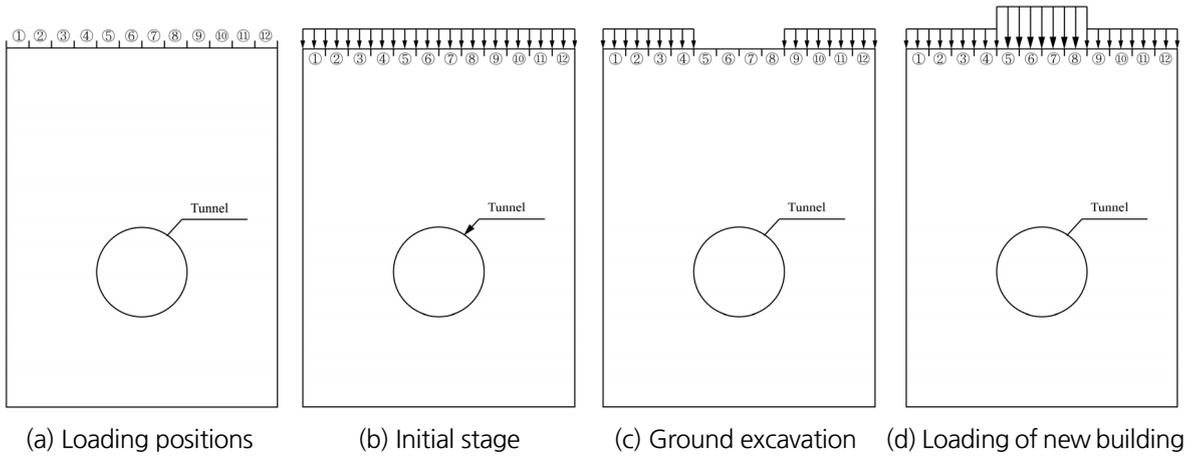


Fig. 4. Loading positions of the model tests



(a) Installation of loading plate



(b) Loading on the plate with hydraulic cylinders

Fig. 5. Installation of loading system on the surface

3. 대형모형시험 결과

터널 상부 지반굴착 후 신축구조물 시공에 따른 기존 터널의 내공변위와 부재력(모멘트, 축력)의 분석을 통하여 기존 터널의 거동 특성을 파악하였다.

3.1 터널 직상부 지반굴착 및 건물하중 폭에 따른 기존 터널의 거동

3.1.1 터널 내공변위

지반굴착 종료 후 건물하중을 가하였을 때 하중의 증가함에 따라서 천단변위는 하향으로 발생하였고 측벽변위는 터널 외부방향으로 발생하였으며 전체적인 형상은 하중이 재하되면 원에서 타원형으로 변형되었고, 좌우대칭을 이루는 것을 확인할 수 있었다. 또한 굴착 깊이가 5.0 m, 10.0 m, 15.0 m로 깊어짐에 따라서 터널의 내공변위는 점점 감소하였다. 건물하중 폭이 1.0D에서 3.0D로 증가함에 따라서 터널의 내공변위가 증가함을 확인할 수 있

었다. 이러한 터널라이닝의 내공변위 변화과정을 대형모형시험 Case 1, Case 2 및 Case 3에서의 지반굴착부터 단계별로 건물하중을 가하였을 때의 각 단계별 터널라이닝 내공변위 변화과정은 Fig. 6~8과 같다. 터널 상부에 하중을 재하하게 되면 지중응력의 영향으로 지반 내 응력의 증가로 터널에 영향을 받게 되는데 이중 재하폭이 커짐으로써 지중응력의 증가량이 커져 터널 내공변위가 증가하는 것으로 판단된다.

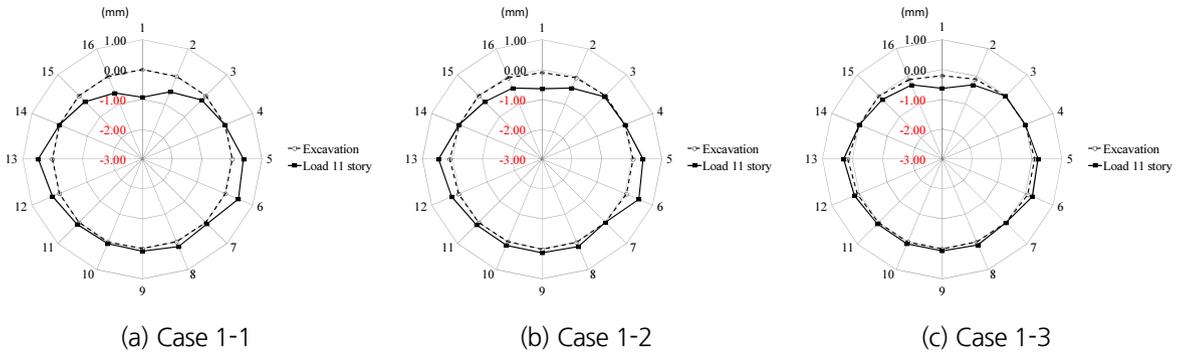


Fig. 6. Displacement of tunnel for series Case 1

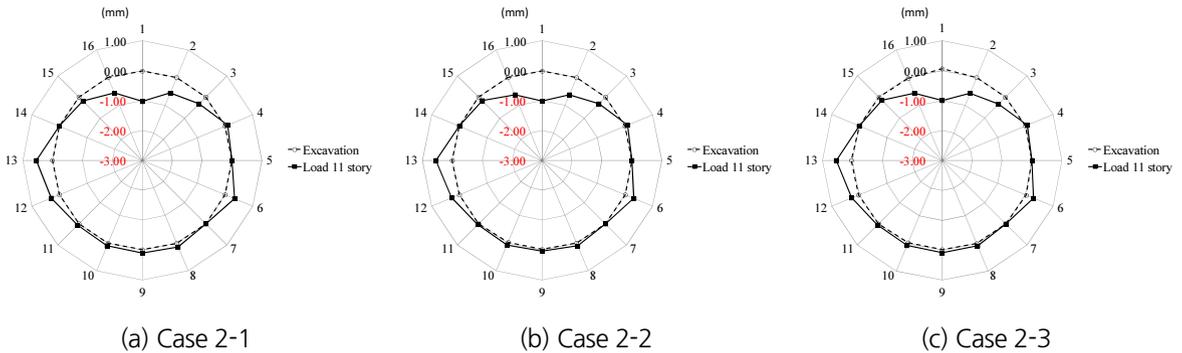


Fig. 7. Displacement of tunnel for series Case 2

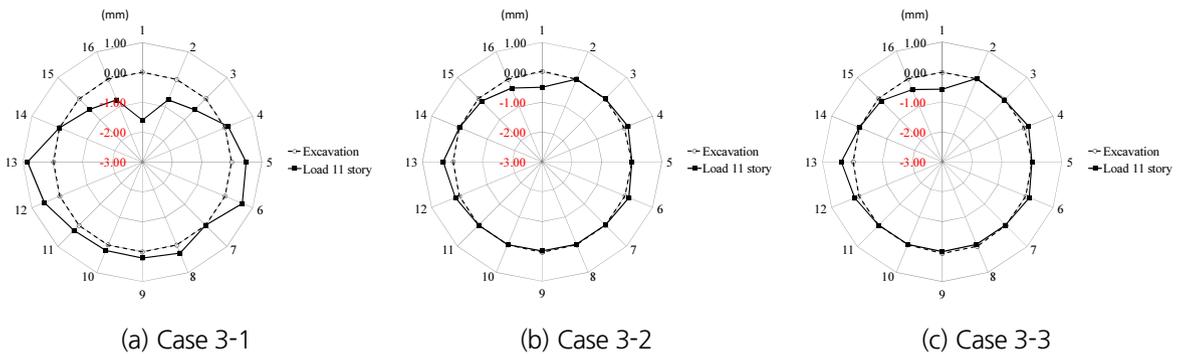


Fig. 8. Displacement of tunnel for series Case 3

터널 상부 하중폭에 대한 터널 천단변위를 분석하면 Fig. 9와 같이 재하폭이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 구조물 상부에 신규하중이 작용할 시에 터파기 깊이에 대한 영향 보다 하중 폭에 대한 영향이 더 크며 터널 하부로 하중작용이 선형 작용하는 것으로 판단된다(Fig. 9).

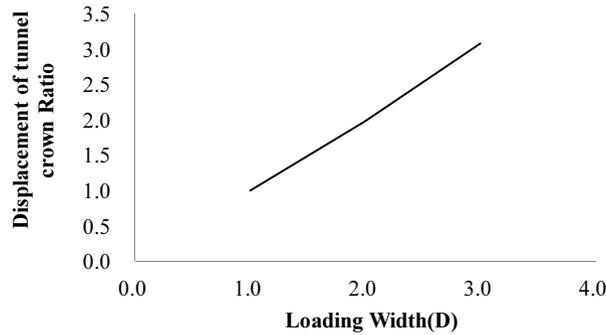


Fig. 9. Displacement of tunnel crown loading width

3.1.2 터널 부재력

터널에 작용하는 모멘트는 천단부와 수평방향에서 부재력이 발생하였다. 하중의 크기가 증가할수록 천단 및 수평방향에서 모멘트가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전체적인 모멘트 발생 형상은 천단부에서 감소하고 좌우 측부에서 모멘트가 터널 밖으로 발생하는 형상으로 나타났다. 터널 상부에 하중으로 인하여 천단부는 내공 쪽으로 모멘트가 발생하며 수평부는 터널 외측으로 모멘트가 발생하는 형상이다. 이러한 형상은 Fig. 10~15와 같이 재하폭이 커지면 터널 수평측 보다 천단부에서의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 터널의 축력은 하중폭이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 터널 주변의 지반에서 응력이 증가하여 지중에 설치되어 있는 터널 라이닝에 응력이 증가하는 것으로 판단된다.

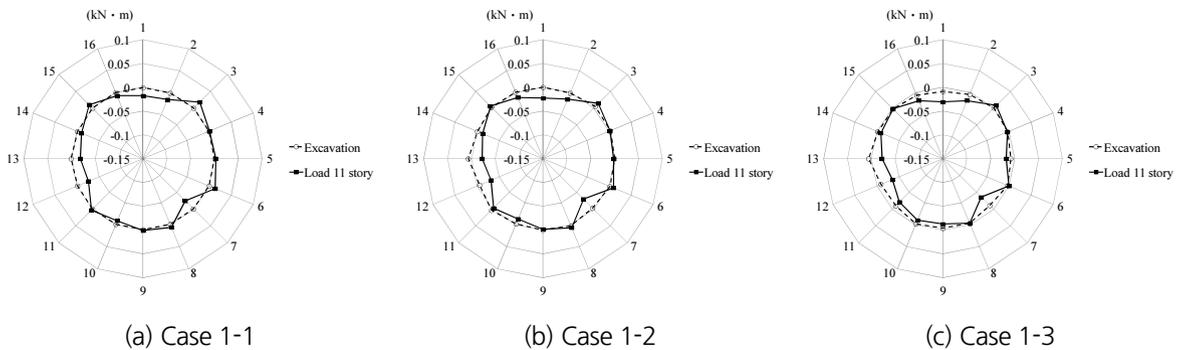


Fig. 10. Moment of tunnel for series Case 1

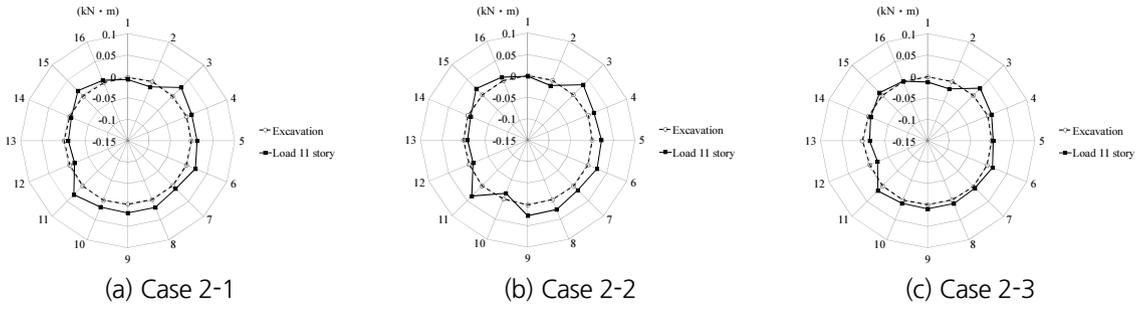


Fig. 11. Moment of tunnel for series Case 2

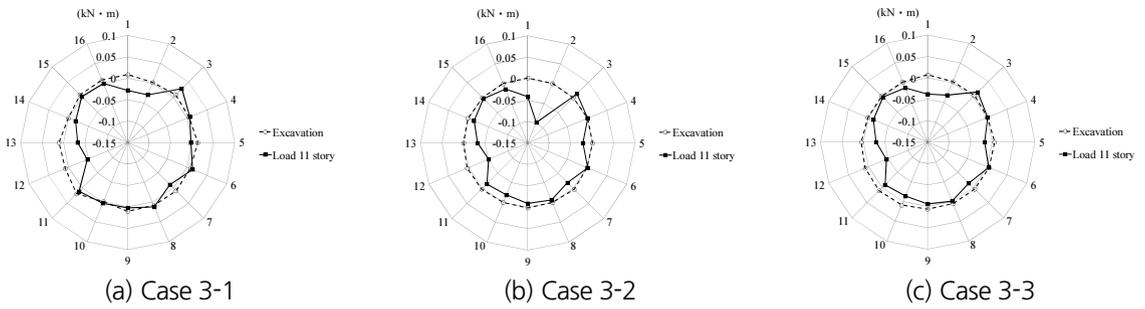


Fig. 12. Moment of tunnel for series Case 3

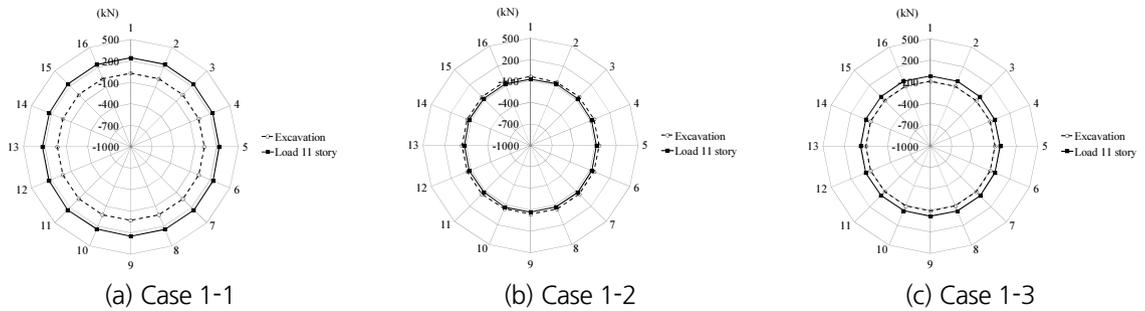


Fig. 13. Axial force of tunnel for series Case 1

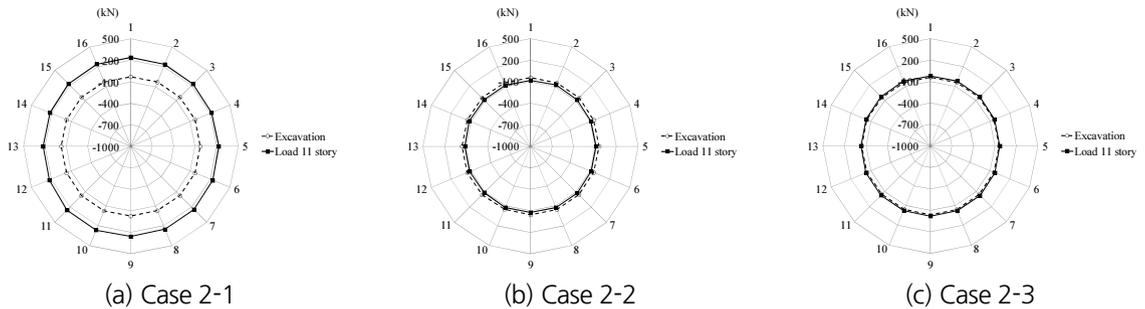


Fig. 14. Axial force of tunnel for series Case 2

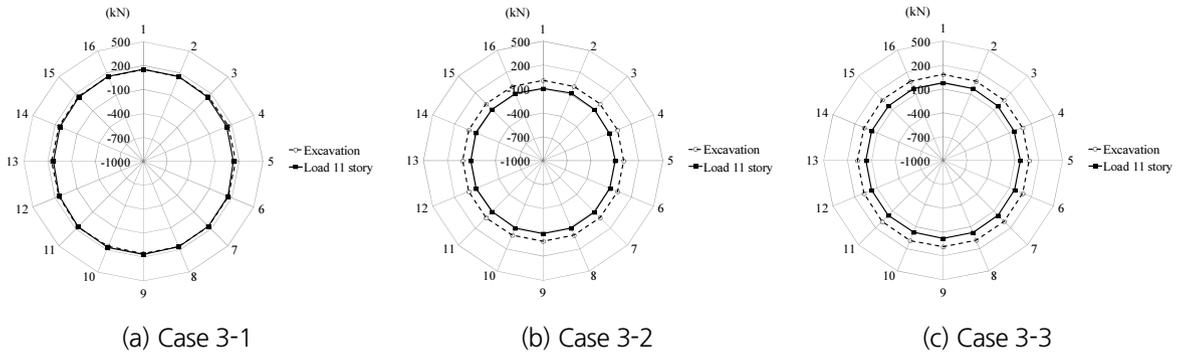


Fig. 15. Axial force of tunnel for series case 3

3.2 터널 천단 상부와 굴착깊이의 이격거리에 따른 터널의 거동

3.2.1 터널 내공변위

터널의 내공변위는 터널 천단 상부지표면에서 0.0D (Case 1), 0.5D (Case 4) 및 1.0D (Case 5) 이격하여 지반 굴착 종료 후 건물하중을 단계별로 가하였을 때 하중이 증가함에 따라 지하 터파기와 이격거리가 더 가까이 있는 터널라이닝의 내공변위량이 상대적으로 더 크게 발생하였다. 동일 하중에서 굴착깊이가 증가함에 따라 터널라이닝의 내공변위가 Case 1은 -0.52~0.63 mm, Case 4는 -0.42~-0.57 mm, Case 5는 -0.25~-0.57 mm로 터널 중심과 신설구조물이 이격거리가 0.5D 부터는 감소하는 경향이 나타났다. 이는 터널에서 멀어질수록 터널 주변의 응력 전달이 작게 작용하여 발생하는 것으로 판단된다(Fig. 16, 17).

터널 상부에서 수평이격하여 신규하중이 작용하는 경우에 터널 천단변위는 직상부에서 신규하중이 작용하는 것(Fig. 6)을 기준으로 0.5D 이격 시에는 81%, 1.0D 이격 시에는 45%로 감소하는 것을 확인하였다. 터널과 수평 이격할 경우는 터널 주변에 작용하는 응력이 감소하여 이러한 경향이 나타난다고 판단된다(Fig. 18).

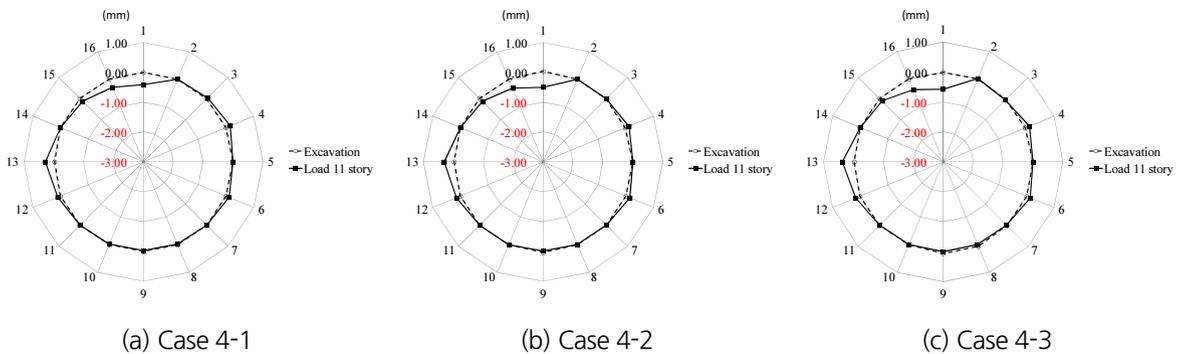


Fig. 16. Displacement of tunnel for series Case 4

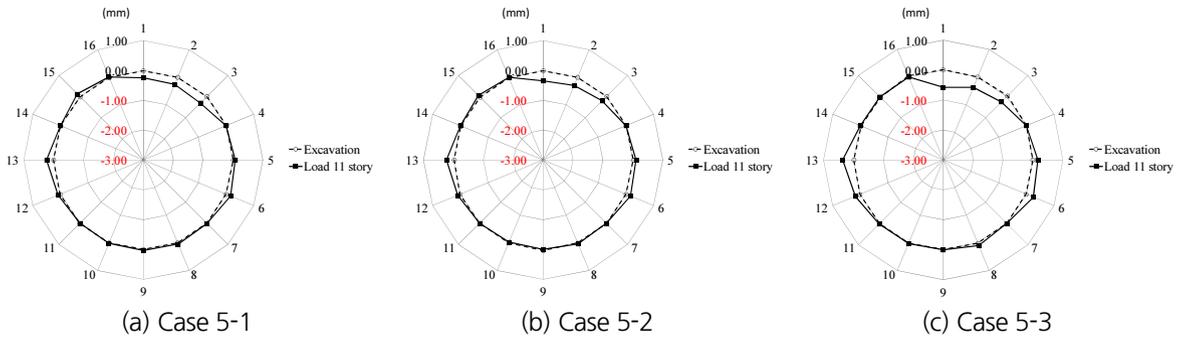


Fig. 17. Displacement of tunnel for series Case 5

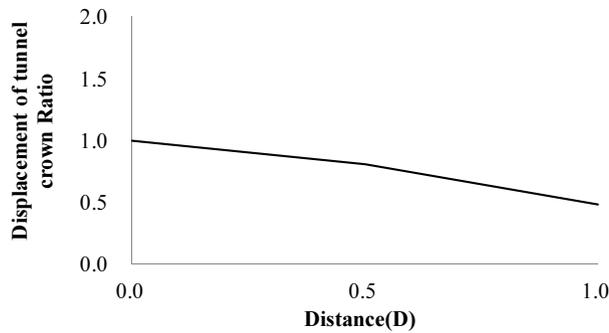


Fig. 18. Displacement of tunnel crown loading distance

3.2.2 터널 부재력

터널의 모멘트는 상부 하중이 터널에서 멀어질수록 작게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 변형 형상 또한 내공변위 형상과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 터널의 축력은 터널 상부에 하중과 거리가 멀어질수록 감소하는 경향이 나타났다. 이는 터널 내공변위 및 모멘트와 마찬가지로 터널 상부 작용하는 하중은 터널과 이격될수록 터널 주변지반에 미치는 영향이 감소하여 나타나는 현상으로 판단된다(Fig. 19~22).

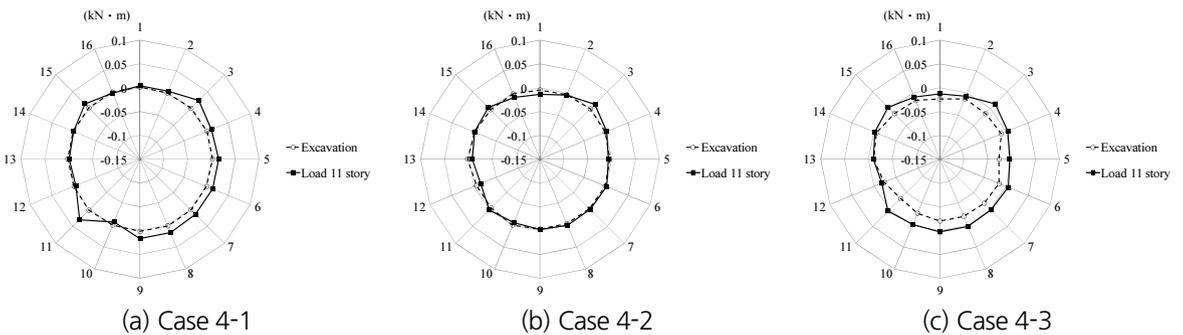


Fig. 19. Moment of tunnel for series Case 4

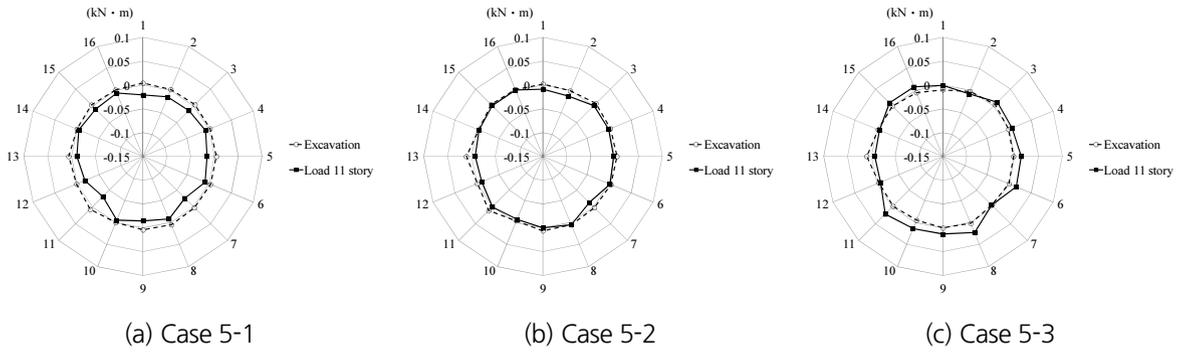


Fig. 20. Moment of tunnel for series Case 5

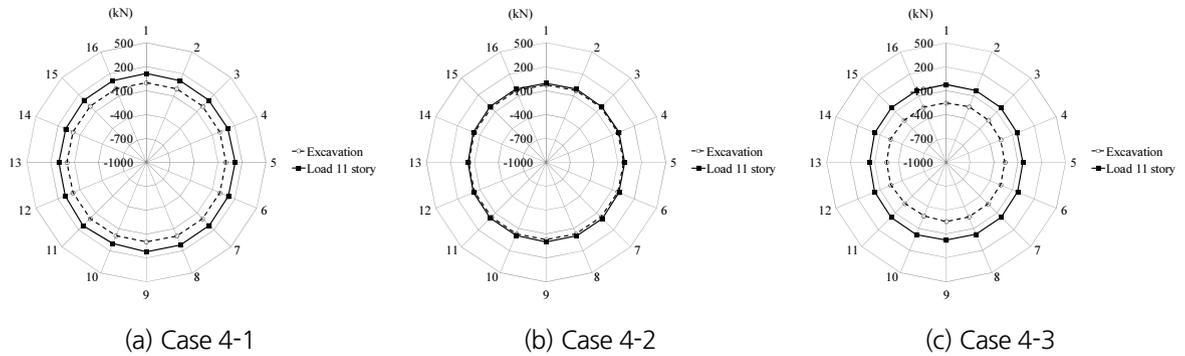


Fig. 21. Axial force of tunnel for series Case 4

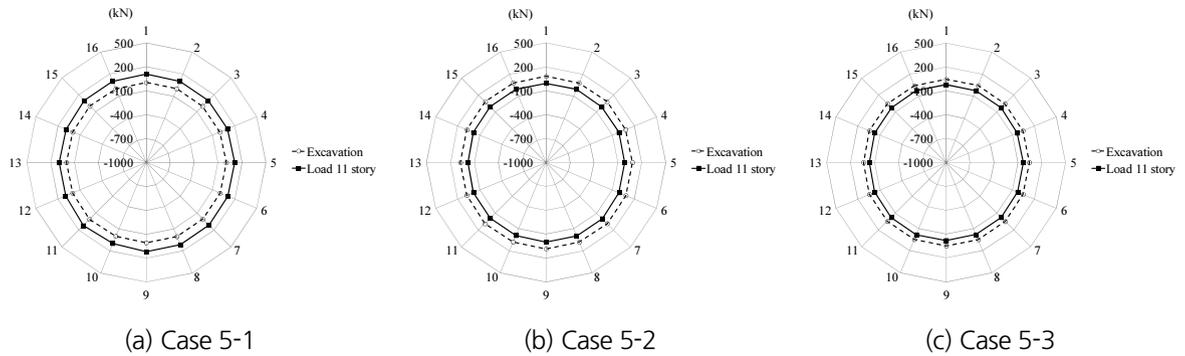


Fig. 22. Axial force of tunnel for series Case 5

4. 결론

본 연구에서는 기존터널 직상부 지반을 굴착한 후 신축구조물을 설치하는 경우에 대해 하중 작용위치와 하중 증가에 따른 터널의 거동 및 신축구조물 폭 증가에 따른 기존 터널의 거동을 대형모형시험을 수행하여 규명하였

으며, 터널 상부 지하터파기 시공 시 지하터파기 위치, 신축구조물 하중의 크기 및 신축구조물 폭에 따른 기존 터널 및 주변지반의 역학적 거동 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존 터널 상부 지반굴착 시 지하굴착 깊이 및 건물하중 폭이 증가함에 따라 터널내공변위가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 건물하중 폭 증가에 따라 터널내공변위는 최대 50% 정도 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 지하굴착 깊이 증가에 따른 터널내공변위는 5~20% 증가하였다.
2. 기존 터널 상부 굴착 시 지하굴착 깊이 및 건물하중 폭이 증가함에 따라서 터널의 부재력(모멘트, 축력 등)이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 지하굴착 깊이 증가에 따른 터널 부재력의 증가폭보다 건물하중 폭 증가에 따른 터널 부재력의 증가폭이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 터널의 부재력 또한 지하터파기의 영향보다 건물하중 폭의 영향이 더 크다는 것을 나타내며 건물 하중폭이 커짐에 따라 지반 응력 증가로 터널에 영향을 주기 때문으로 판단된다.
3. 기존 터널 상부에 지하터파기 후 신축구조물 시공 시 터널 내공변위 및 터널 부재력을 비교 분석한 결과 지반 굴착고의 증가보다 신축구조물 폭의 증가가 터널 주변의 응력 증가로 인하여 기존 터널에 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.
4. 기존 터널과 지하터파기 시공 위치에 따른 기존 터널의 내공변위 및 터널 부재력을 종합적으로 분석해보면 지하터파기 시공 시 기존 터널 거동에 영향이 큰 범위는 1.0D라고 판단된다.

References

1. Boscardin, M.D., Cording, E.J. (1989), "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 1, pp. 1-21.
2. Burland, J.B. (1995), "Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation", *Proceedings of the 1st Conference of Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.1189-1202.
3. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), "structural design models for tunnels in soft soil", *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp.246-259.
4. Hergarden, H.J.A.M., Van der Poel, J.T., Van der schrier, J.S. (1996), "Ground movements due to tunneling influence on pile foundation", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Rotterdam, Balkema, pp. 519-524.
5. Jacobsz, S.W., Standing, J.R., Mair, R.K., Soga, K., Hagiwara, T., Sugiyama, T. (2001), "Tunnelling effect on driven piles", *Proceeding of the International Conference on response of Building to Excavation-Induced Ground Movements*, Imperial College, London, CIRIA, pp. 1-15.
6. Kim, C.Y., Hong, S.W., Bae, G.J., Lee, S.W., Park, C.H., Go, G.S. (1999), "Development of the expert system integrated neural network for the appropriateness of the tunnel design (II)", *KICT*, pp. 227-230.
7. Kim, D.G. (2005), Behavior of the ground in crossed area due to tunnel excavation under an existing tunnel, Ph.D. Thesis, University fo Ajou Graduate School, University of Ajou, pp. 32-56.

8. Kim, I., Lee, S.D. (2007), "Behavior of tunnel due to adjacent ground excavation with pre-loading on braced wall", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 10, pp. 163-174.
9. Lee, H.S., Kim, D.Y., Chun, B.S., Jung, H.S. (2009), "A study on the optimum range of reinforcement in tunneling adjacent to structures", *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, pp. 199-211.
10. Morton, J.D., King, K.H. (1979), "Effects of tunneling on the bearing capacity and settlements of piled foundations", *Proceeding of the 2nd International Symposium of the Institution of Mining and Metallurgy: Tunnelling 79*, Institute of Mining and Metallurgy, London, pp. 57-68.
11. Seoulmetro (2001), *Existing tunnel close construction management manual*, Seoulmetro, pp. 148-154.
12. Soilman E., Duddeck, H., Ahrens, H. (1993), "two-and Three dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 1, pp.13-18.
13. Son, M.R., Cording, E.J. (2005), "Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 2, ASCE, pp. 162-177.