

터널에 인접한 흙막이굴착 시 터널 이격거리에 따른 거동특성

안성주¹ · 이상덕^{2*}

¹정회원, 삼성물산 건설부문 인프라사업부 화도양평간 도로3공구 책임

²정회원, 아주대학교 건설교통시스템공학과 교수

Behavior of braced wall due to distance between tunnel and wall in excavation of braced wall nearby tunnel

Sung Joo Ahn¹ · Sang Duk Lee^{2*}

¹Deputy Manager, Hwado-Yangpyeong Expressway Section 3, Infra Structure Business Unit, Samsung C&T Corporation

²Professor, Dept. of Civil and Transportation Engineering, Ajou University

*Corresponding Author : Sang Duk Lee, lsangduk@ajou.ac.kr

Abstract

In recent years, the development of complex urban areas has become saturated and much attention has been focused on the development of underground space, and deep excavation is frequently performed in order to increase the utilization of underground space due to the enlargement of buildings and the high rise of buildings. Therefore, in this study, we tried to understand the behavior of the braced wall and the behavior of the tunnel adjacent to the wall according to the stiffness of the wall and the distance between the tunnel and wall. As a result of the study, the deformation of the braced wall tended to decrease with increasing the stiffness of the wall, and the axial force acting on the struts was also different according to the stiffness of braced wall. When the stiffness of the braced wall is small (2 mm), the point at which the axial force of the braces maximizes is near 0.3H of the wall. When the stiffness of the braced wall is large (5 mm), the axial force is maximum at around 0.7H of the wall. Also, the tunnel convergence occurred more clearly when the separation distance from the braced wall was closer, the stiffness of the wall was smaller, and the tunnel convergence was concentrated to the lower right part. The ground settlement due to the excavation of the ground tended to decrease as the distance between tunnel and braced wall was closer to that of the tunnel, which is considered to be influenced by the stiffness of the tunnel.

Keywords: Braced wall, Wall stiffness, Adjacent construction, Model test, Adjacent tunnel

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(4)657-669(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.4.657>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received May 4, 2018

Revised May 23, 2018

Accepted May 28, 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.kci.go.kr

초 록

최근 복잡한 도심지 개발이 포화상태에 이르러 지하공간 개발에 많은 관심이 집중되고 있으며, 건물의 대형화 및 고층화로 지하공간의 활용도를 높이기 위해 대심도 굴착이 자주 발생하고 있다. 또한, 도심지 기존도로 하부로 지하철, 경전철 등이 건설되고 있어 대형건물 신축을 위한 흙막이 굴착 시 기존 지하구조물과 인접하여 주의를 요하는 사례가 자주 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 모형시험을 통해 흙막이벽체 강성과 터널 이격거리에 따른 흙막이벽체의 거동특성 및 인접한 터널의 거동을 파악하고자 하였다. 연구 결과, 흙막이벽의 변형은 벽체의 강성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 버팀대에 작용하는 축력도 벽체의 강성에 따라 다른 양상을 보였다. 흙막이벽체의 강성이 작은 경우(2 mm) 버팀대 축력이 최대가 되는 지점은 벽체의 0.3H 부근에서 나타났고, 흙막이벽체의 강성이 큰 경우(5 mm)에는 벽체의 0.7H 부근에서 버팀대 축력이 최대로 나타났다. 또한, 터널 내공변위는 흙막이벽체와의 이격거리가 가까울수록, 벽체의 강성이 작을수록 뚜렷하게 발생하였으며 내공변위가 우측하부로 집중되는 경향을 보였다. 지반굴착에 따른 지표침하량은 터널과 흙막이벽체의 이격거리가 가까울수록 지표침하 영향범위가 감소하는 경향을 보였으며 이는 터널의 강성이 영향을 미친 것으로 판단된다.

주요어: 흙막이벽체, 벽체강성, 근접시공, 실내모형시험, 인접터널

1. 서론

최근 도심지에서의 인구증가와 이로 인한 고층건물 및 지하철 등의 개발이 집중되고 있다. 또한 도시가 복잡대형화되면서 고층빌딩의 증가는 물론 지하철, 경전철 등과 같은 새로운 교통수단이 도입되면서 협소한 도심지의 면적으로 인해 신설 구조물의 시공은 기존 구조물에 매우 인접하여 시공되는 사례가 증가하고 있다. 이러한 도심지 근접시공은 기존 구조물의 균열 및 지하매설물의 손상, 그리고 시공 중 흙막이벽체의 붕괴에 따른 피해가 심각해지고 이에 따른 막대한 인적 손실과 경제적 손실을 초래할 수 있다(Lee, 2010). 굴착공사에서 흙막이벽체와 인접구조물에 영향을 미치는 요인은 굴착 시 발생하는 흙막이벽체의 수평변위와 지하수위 강하에 의한 유효응력 증가에 따른 흙막이벽체 배면지반의 침하 그리고 공사 지연 또는 장기간 방치에 의한 흙막이벽체의 추가변형 등이 있다(Choi, 2013a). 인접터널과 흙막이벽체 간 이격거리 및 인접터널의 토피고와 같은 영향요소들은 전체 흙막이구조물의 안정성 확보에 매우 중요할 뿐 아니라 주변지반 및 인접구조물의 안정성 확보에도 매우 중요하다(Lee, 2010). 특히 인접구조물에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 배면지반의 변형을 유발하는 흙막이벽체의 수평변위이다. 따라서 인접구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 흙막이벽체의 수평변위를 억제하는 것이 가장 좋은 방법이며 이를 위해서 흙막이벽체의 강성을 증가시키거나, 굴착단계별로 선행하중을 재하하여 흙막이벽체의 수평변위를 제어하는 방법, 벽체 배면지반에 그라우팅을 실시하여 지반의 강도를 증가시킴으로 배면토압을 줄이는 방법 등이 적용되고 있다(Choi, 2013b).

기존에 진행된 연구는 버팀보식 흙막이벽체 거동에 관련된 연구(Yoo, 2000; Back, 2002) 가 다수 있으며, 인접하여 터널이 있는 경우(Kim, 2007), 터널상부에 상재하중이 있는 경우(Lee, 2010) 등에 대한 연구가 진행되었다.

따라서 본 논문에서는 기존터널에 인접하여 지반굴착이 이루어지는 상황을 모형시험으로 구현하여 흙막이벽체 강성 및 인접터널의 이격거리에 따른 거동을 파악하고자 하였다. 이를 위해 흙막이벽체의 두께를 2 mm, 3 mm, 5 mm 3가지로 선정하고 흙막이벽체에 인접한 터널 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.5D 3가지를 변화시켜 모형시험을 수행하였으며 이를 통해 터널과 흙막이벽체의 지반 거동 특성을 파악하고자 하였다.

2. 모형시험

2.1 시험개요

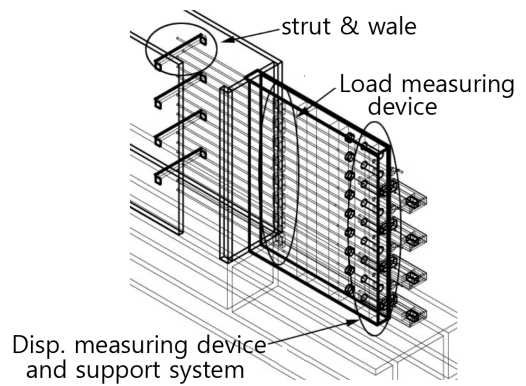
본 논문에서는 기존 터널에 근접하여 흙막이벽체 시공 시 흙막이벽 강성 및 터널의 이격거리를 변화시켜 모형 시험을 수행하였으며, 이 때 흙막이벽 강성과 터널의 이격거리에 따른 벽체 변위와 벽체에 작용하는 단면력, 터널의 내공변위, 벽체 배면의 지표침하 등에 미치는 영향을 종합적으로 분석하여 기존터널에 인접할 경우 흙막이벽 강성에 따른 터널 이격거리별 영향을 분석하고자 하였다.

2.2 모형시험장치

실내 모형시험기는 270 mm × 1700 mm × 1200 mm (폭 × 길이 × 높이)로 제작하였으며, 벽체는 시험의 전 과정을 외부에서 모니터링 할 수 있도록 투명 아크릴판과 유리를 이용하여 제작하였다. 굴착을 모사하기 위해 100 mm 씩 굴착판을 제작하여 탈부착이 가능하도록 하였으며 모형지반 조성은 샌드커튼(sand curtain)방식의 강사장치를 사용하였다. 직경 8 mm의 강봉과 베크라이트판을 이용하여 띠장을 제작하였고, 버팀대는 직경 12 mm의 강봉을 이용하여 제작하였으며, 버팀대 후면에는 볼트를 이용하여 굴착 후 가압할 수 있도록 하였다. 버팀대 중앙부에는 하중 측정장치를 설치하여 버팀대 축력을 측정할 수 있도록 Fig. 1(b)와 같이 설치하였다.



(a) Test equipment



(b) Support and measuring system

Fig. 1. Scheme of the model test equipment

2.3 흙막이벽체 및 모형터널

모형시험에 사용된 흙막이벽체는 비교적 강성이 크고 변형 및 성형이 쉬운 베크라이트판을 이용하여 270 mm × 900 mm (폭 × 높이)의 크기로 제작하였으며 벽체강성을 조절하기 위하여 베크라이트판 두께를 3가지로 선정하였다. 흙막이벽체의 두께는 실제 현장에서 적용되고 있는 H-pile + 목재판공법, SCW공법, Slurry wall 공법 등 3가지를 선정하고, 실제 흙막이벽체와 모형 흙막이벽체의 강성차이를 기본차원 질량[M], 길이[L], 시간[T]의 축소율을 고려한 상사법칙을 통하여 구하였으며 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of each braced wall and thickness of model braced wall

Item	H-pile (300 × 200 × 9 × 14)	S.W.C	Slurry wall
Elastic modulus of wall (kN/m ²)	2.0 × 10 ⁸	2.0 × 10 ⁸	2.1 × 10 ⁷
Width of wall (m)	1.0	1.0	1.0
Wall thickness (m)	0.3	0.45	0.6

Item	Real braced wall	Thickness of model braced wall
H-pile (300 × 200 × 9 × 14)	C.T.C = 1.8 m, 300 × 200 × 9 × 14 with wooden plate	T = 2.0 mm
S.C.W	C.T.C = 0.9 m, 300 × 200 × 9 × 14 with concrete pile (D = 450 mm)	T = 3.0 mm
Slurry wall	Concrete wall with rebar (thickness: 0.6 m)	T = 5.0 mm

모형터널의 크기는 길이(L)에 대한 대응비를 적용하여 실제 터널의 크기(D = 7 m)로부터 1/30 축척인 직경 20 cm로 하였고, 모형터널의 두께는 실제 터널라이닝 두께를 적용하여 지반과 라이닝의 상대강성비(α)를 이용하여 결정하였다. Duddeck and Ermann (1985)의 지반과 라이닝의 상대강성비(α)는 각각의 지반의 강성 및 터널라이닝 제원에 따라서 아래 식으로 나타낼 수 있으며 그 값은 Table 2와 같다.

$$\text{실제 연구 대상 터널의 강성비: } \alpha = \frac{E_k R^3}{E_b I_b}$$

$$\text{모형터널 강성비: } \alpha = \frac{E_{km} R_m^3}{E_{bm} I_{bm}} \quad (1)$$

$$\text{모형터널 두께: } t_m = \left\{ \frac{12 \times E_{km} \cdot R_m^3}{\alpha \cdot E_{bm}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

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

$E_b (E_{bm})$: 실제(모형)라이닝 탄성계수(kN/m²) $t (t_m)$: 실제(모형) 터널 라이닝 두께(m)

$I_b (I_{bm})$: 실제(모형)라이닝의 단위길이 당 단면2차 모멘트(kN/m³)

Table 2. Relative stiffness ratio of model tunnel

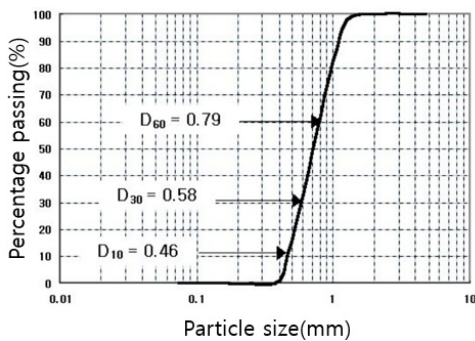
Item	Real tunnel lining	Model tunnel lining
Elastic modulus of soil (MPa)	350	20
Elastic modulus of lining (kN/m ²)	2.0×10^7	2.1×10^8
Radius of lining (m)	3.5	0.1
Thickness of lining (m)	0.2	0.001

2.4 모형지반

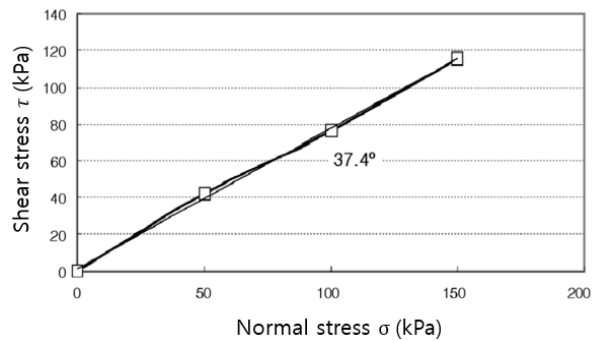
실내모형시험의 지반은 균질하고 상대밀도가 일정하도록 주문진 표준사를 사용하여 시험지반을 조성하였다. 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 낙하고를 조절할 수 있는 샌드커튼(sand curtain) 방식의 강사장치를 사용하여 모형지반을 조성하였다. 모형시험에 사용된 강사장치는 270 mm × 300 mm × 1300 mm (폭 × 길이 × 높이)의 크기로 강사고를 일정하게 유지하기 위하여 측면에 롤러를 부착하여 토피고 증가에 따라 강사기가 상향으로 이동되도록 하였으며, 강사장치 하부에도 롤러를 부착하여 강사레일을 따라 자유롭게 이동하도록 제작하였다. 모형지반은 입도분포시험(KS F 2302), 최대·최소건조단위중량시험(KS F 2345)을 통하여 물리적 특성을 파악하고 직접전단시험(KS F 2342)을 실시하여 모형지반의 역학적 특성을 파악하였다. 모형지반의 물리적, 역학적 특성은 Table 3과 같고, Fig. 2는 모형지반에 사용된 지반의 입도분포곡선과 직접전단시험 결과를 나타내었다.

Table 3. Physical and mechanical properties of model ground

Particle size distribution	Max. dry unit weight (γ_{dmax})	Min. dry unit weight (γ_{dmin})	Unit weight (γ_d)	Relative density (D_r)	Internal friction angle (ϕ)	Cohesion (c)
$C_u = 1.72$, $C_c = 0.93$ $D_{10} = 0.46$, SP	17.9 kN/m ³	14.6 kN/m ³	16.9 kN/m ³	73.8%	37.4	0



(a) Grain size accumulation curve



(b) Result of direct shear test

Fig. 2. Grain size accumulation curve of model ground and result of direct shear test

2.5 계측

본 실내모형시험에서는 흙막이 벽체, 기존 터널, 지표침하의 거동을 분석하기 위해 각각의 위치에 계측기를 설치하였으며, 시험이 진행되는 동안 각 굴착단계별로 데이터 로거 및 PC를 통해 계측 및 저장이 되도록 하였다.

흙막이벽체의 수평변위와 축력은 지반조성 전에 흙막이벽체 상단 50 mm하부에서부터 심도별 100 mm간격으로 9개의 변위계와 8개의 하중 측정장치가 설치된 흙막이벽체 버팀대를 설치하고 지반이 조성된 후 초기치를 설정하고 단계별 굴착에 따른 흙막이벽체의 변위와 버팀대 축력을 측정하였다.

터널 변위계(LVDT)는 터널의 내부에 45° 간격으로 8개의 변위계를 지반조성 중 설치하여 지반조성이 완료된 후 초기치를 설정하고 굴착 및 흙막이벽체의 변형에 따른 터널 내공변위를 측정하였다.

지표침하는 지반조성이 완료된 후 흙막이벽에서 50 mm 이격된 곳부터 75 mm간격으로 12개의 변위계를 설치하여 초기치를 설정하고 굴착 및 흙막이벽체의 변형에 따른 지표변위를 측정하였다.

2.6 시험 변수

흙막이벽체의 강성 및 터널 인접도에 따른 흙막이벽체의 거동 특성을 알아보기 위하여 터널의 토피고를 1.5D로 고정하고, 흙막이벽체 두께와 터널의 이격거리를 변화시켜 단계별 굴착을 실제와 유사하게 구현하여 모형시험을 수행하였다. Table 4에는 모형시험의 시험명과 시험변수를 나타내었다.

Table 4. Test cases and variables

Cases	Thickness of wall	Distance between tunnel and braced wall	Cover depth of tunnel
T2D00S10	2 mm	w/o tunnel	1.5D
T3D00S10	3 mm		
T5D00S10	5 mm		
T2D05S10	2 mm	0.5D	
T3D05S10	3 mm		
T5D05S10	5 mm		
T2D10S10	2 mm	1.0D	
T3D10S10	3 mm		
T5D10S10	5 mm		
T2D15S10	2 mm	1.5D	
T3D15S10	3 mm		
T5D15S10	5 mm		

2.7 시험 방법

본 실내모형시험은 흙막이벽체 두께 및 터널과의 이격거리에 따른 거동특성을 파악하기 위한 시험으로 다음과 같은 순서로 시험을 진행하였으며 Fig. 3은 모형시험기 굴착개요도를 나타낸 것이다.

지반 조성 전에 흙막이벽체가 움직이지 않도록 미리 고정된 후 강사장치를 이용하여 지반을 조성한다. 모형지반은 샌드커튼 방식으로 조성하였고, 이때 강사고는 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 90 cm 높이를 유지하며 10 cm씩 지반을 조성하였다. 조성지반의 단위중량을 체크하기 위하여 위치별로 3개의 시료관을 설치하고 모형시험 종료 후 단위중량을 확인하였다. 모형터널 바닥부까지 지반 조성 후 모형터널과 계측장치를 설치하였다. 이후 모형시험기 상단(지표면)까지 지반을 조성한 후 지표면위계를 설치하고 단계별 굴착을 진행하였다. 총 9단계 굴착으로 각 단계별로 굴착 완료 후 5분의 안정화 시간을 주고 버팀대를 벽체에 밀착시키면서 모형시험을 수행하였다. 이러한 시험과정은 각 시험변수별로 동일한 순서로 반복되었다.

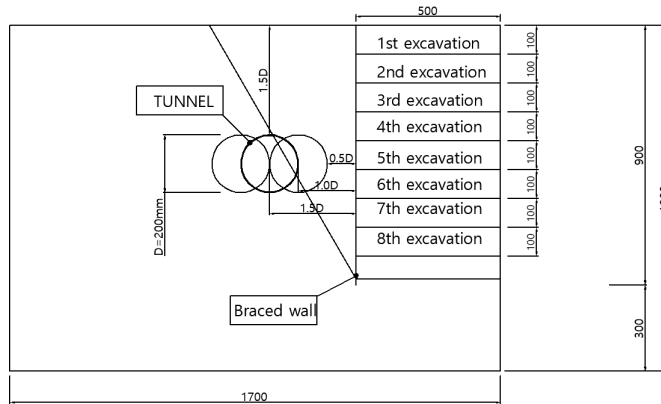


Fig. 3. Dimension of the model test equipment

3. 결과분석

본 논문에서는 흙막이벽체 강성과 터널의 이격거리를 변화시켜 시험을 수행하였다. 흙막이벽체 굴착을 단계별로 적용하여 굴착단계별 흙막이벽체의 수평변위와 부재력, 기존 터널의 내공변위 그리고 흙막이벽체 배면지반의 지표침하에 대하여 실내모형시험을 실시하였으며, 이에 따른 흙막이벽체의 거동과 인접터널에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 흙막이벽체에 작용하는 토압

터널 이격거리 및 흙막이벽체 강성에 따라 흙막이벽체에 작용하는 토압을 분석하였으며 Fig. 4(a)는 터널이 없는 경우 흙막이벽체 강성에 따른 토압을 나타내었다. 흙막이벽체 두께에 따라 최대토압이 작용하는 위치가 다르게

나타났으며, 흙막이벽체 두께가 두꺼워질수록 최대 토압 작용위치가 아래쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 4는 터널 이격거리별로 흙막이벽체 두께에 따른 토압분포를 나타내고 있다. 터널이 없는 경우와 마찬가지로 흙막이벽체 두께가 얇은 경우(2 mm) 흙막이벽체 높이의 0.3H 부근에서 토압이 크게 나타났으며, 흙막이벽체 두께가 두꺼운 경우(5 mm) 흙막이벽체 높이의 0.6H~0.7H 부근에서 토압이 크게 나타났다. 이는 흙막이벽체 두께가 얇은 경우 상부 0.3H 주변의 수평변위가 크게 발생하여 지반 내 흙 입자가 상부에서 재배열 되면서 토압이 크게 발생한 것으로 판단되며, 흙막이벽체 두께가 두꺼운 경우 상대적으로 흙막이벽체의 변형이 크지 않아 일반적인 토압분포 형상과 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.

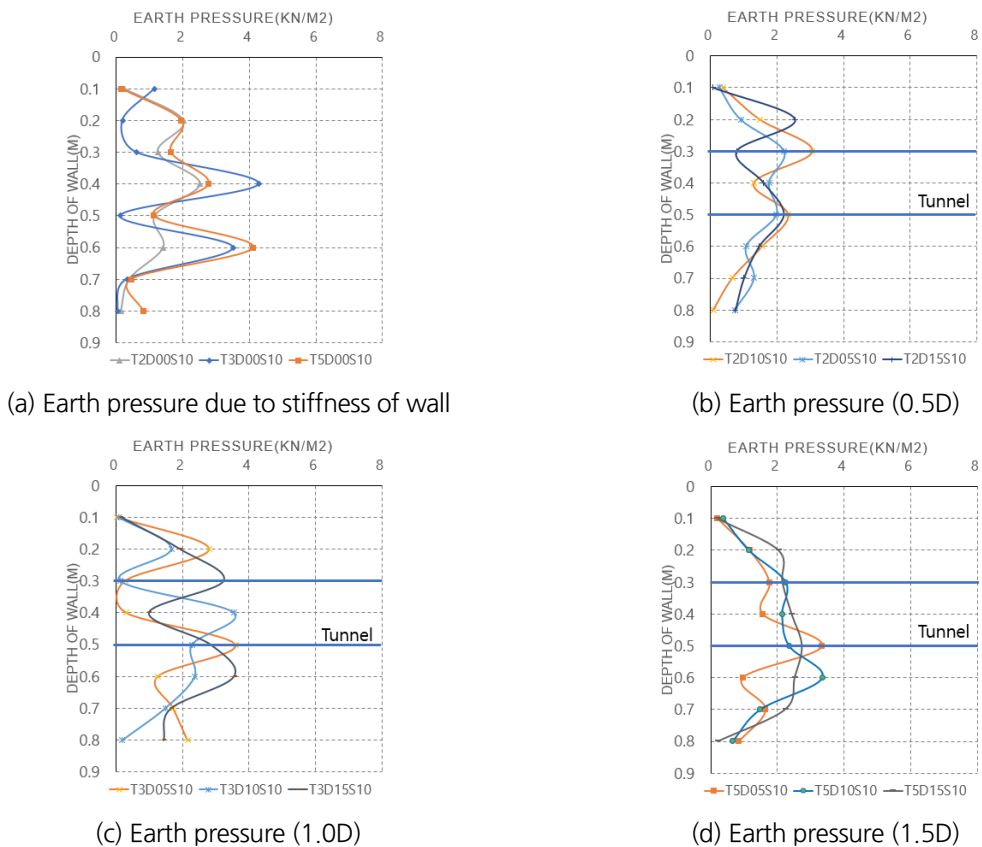


Fig. 4. Earth pressure due to wall stiffness and distance between tunnel and wall

3.2 흙막이벽체의 수평변위

흙막이벽체의 변형은 벽체 강성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 벽체 강성이 상대적으로 작은 경우(2 mm)에는 전체적으로 큰 벽체 변위가 발생하였다. 벽체 강성이 큰 경우(5 mm)에는 벽체 상단부 변위는 작게 나타났으며, 벽체 하단부(0.7H, H: 벽체높이)의 변위가 가장 크게 나타났다(Fig. 5).

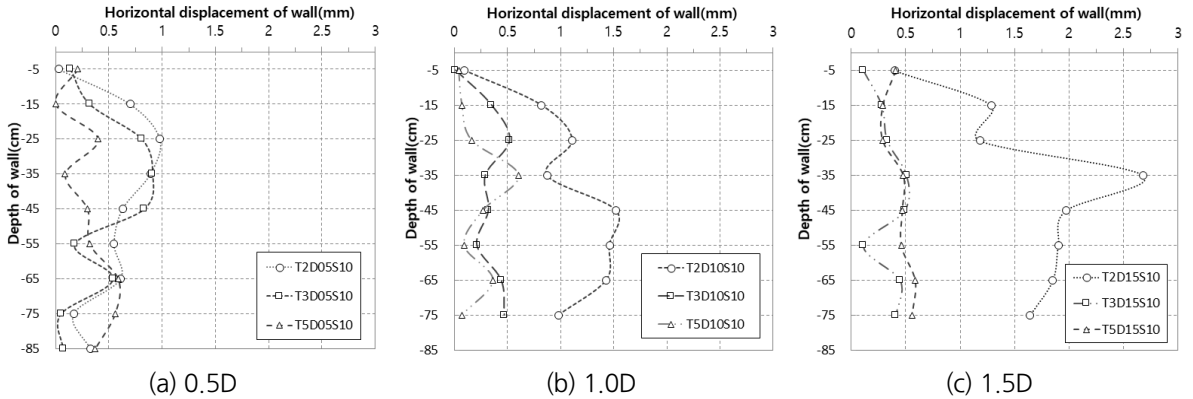


Fig. 5. Horizontal displacements due to stiffness of wall and distance between tunnel and wall

3.3 터널의 내공변위

흙막이벽체의 강성변화와 인접하여 위치하는 기존터널의 이격거리에 따른 터널의 내공변위를 Fig. 6에 나타내었다. 흙막이벽체의 강성과 터널이격거리에 의한 터널의 내공변위 형상은 공통적으로 터널 천단부가 침하되며 우측벽 또는 우측하부 45도 방향으로 찌그러지는 형상이 나타났다. 이는 흙막이벽체에 작용하는 토압으로 인해 수평변위가 발생하고 이로 인해 흙막이벽체 위치 쪽으로 터널 하부가 변형되는 것으로 판단된다. 또한, 흙막이벽과 터널의 이격거리가 가까울수록 터널의 내공변위가 크게 발생하였다. 흙막이벽체 강성에 의한 영향은 터널과 흙막이벽의 이격거리가 가까울수록 터널 내공변위량의 차이가 크게 나타났으며, 이격거리가 멀어질수록 흙막이벽체의 강성에 따른 내공변위 영향은 감소하는 것으로 나타났다.

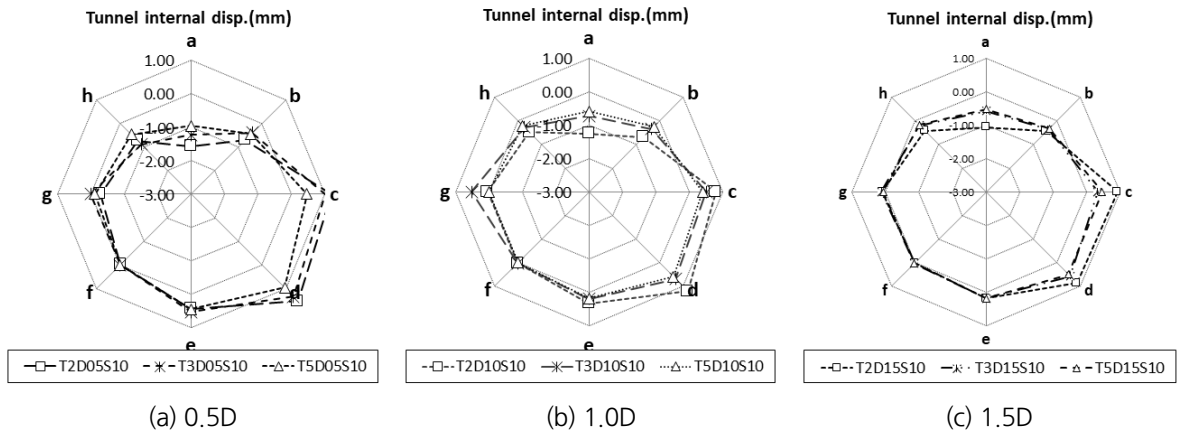


Fig. 6. Tunnel displacements due to wall stiffness and distance between tunnel and wall

Fig. 7(a), 7(b)에 흙막이벽체 두께와 터널 이격거리에 따른 천단침하량과 내공변위량을 나타내었다. 벽체강성이 약할수록 터널과의 이격거리가 가까울수록 천단침하 및 내공변위량이 크게 나타났으며, 벽체강성이 강하고 터널과의 이격거리가 멀어질수록 터널 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 흙막이벽체 단계별 굴착에 따른 터널의 내공변위는 터널이 위치하는 4단계 굴착부터 변위가 크게 발생하기 시작하였으며 최종 9단계 굴착 후 천단부는 침하하였고 터널 측벽 및 하부는 흙막이벽체 방향으로 찌그러지는 형상이 나타났다. 흙막이벽체와 터널의 이격거리가 가까울수록 내공변위가 크게 나타났으며 흙막이벽체 강성에 따른 변화량 차이가 뚜렷하게 나타났다.

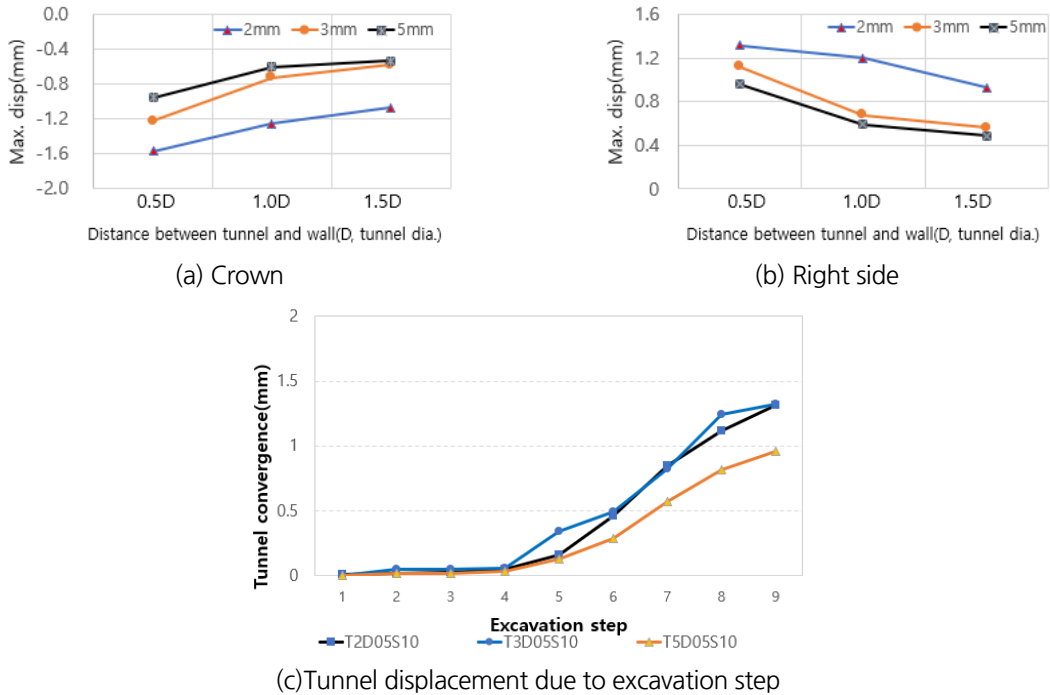


Fig. 7. Maximum tunnel displacement

3.4 인접 지반의 지표침하

흙막이벽체 두께 및 터널과의 이격거리에 따른 배면지반의 지표변위를 Fig. 8에 나타내었다. 터널이 없는 경우 흙막이벽체 강성에 따른 지표침하 양상은 흙막이벽체 강성이 클수록 지표침하량이 감소하는 것으로 나타났으며, 지표침하 영향범위는 $0.9H$ 로 나타났다. 흙막이벽체와 터널과의 이격거리가 가까울 경우(0.5D) 터널의 라이닝 강성으로 인해 흙막이벽체에 인접한 지표 영향범위가 $0.6H$ 로 감소하는 것으로 나타났으며 이격거리가 1.0D인 경우 $0.7H$, 1.5D인 경우 터널이 없는 경우와 유사한 경향을 보였다. 또한 터널과의 이격거리가 가까울 경우 흙막이벽체 수평변위로 인한 지표변위는 흙막이벽체 인접부근에 집중되는 경향을 보였으며, 터널의 이격거리가 증가할수록 지표침하 영향범위가 넓어지는 것으로 확인되었다.

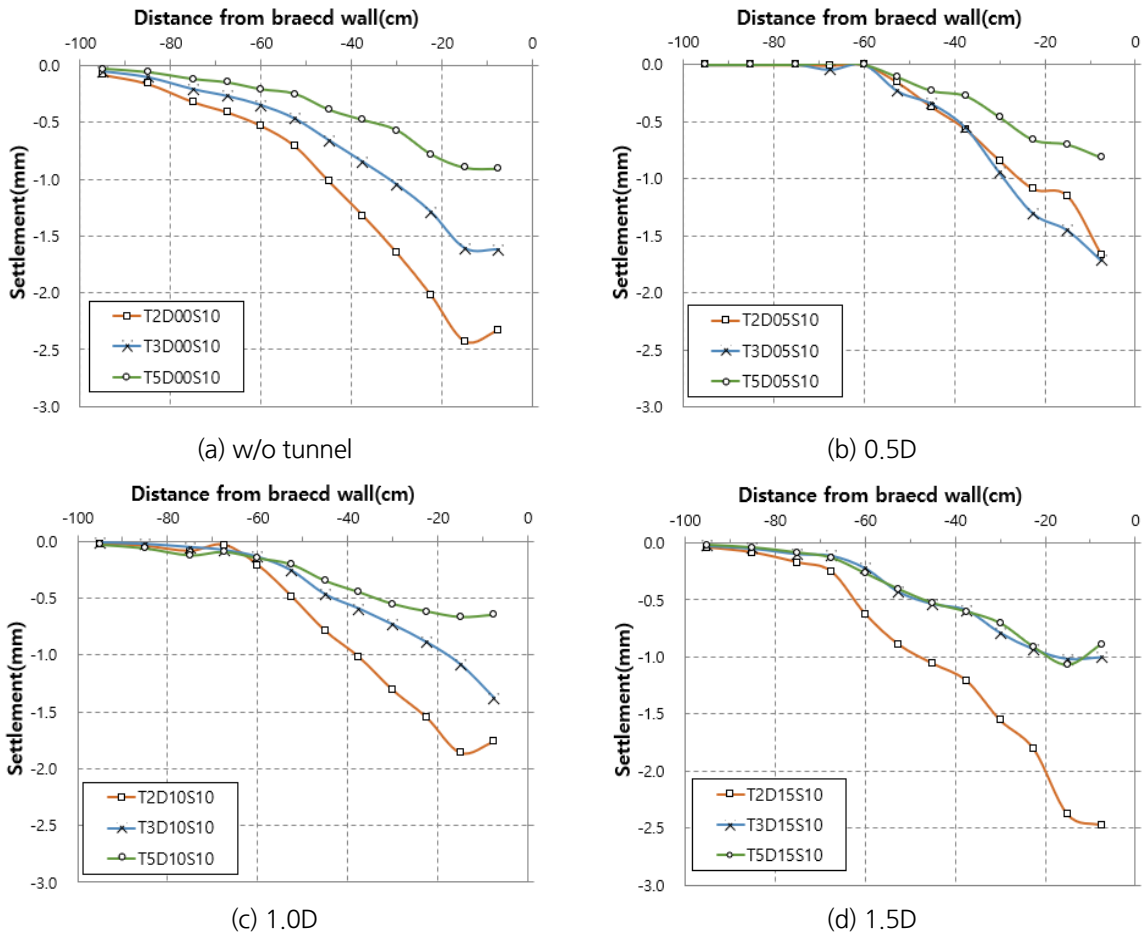


Fig. 8. Ground settlement depending on distance between tunnel and wall

4. 결론

본 논문에서는 흙막이공법의 종류에 따른 흙막이벽의 거동과 인접하여 기존터널이 존재할 경우 터널에 미치는 영향을 파악하고자 흙막이벽체의 두께와 터널의 이격거리를 변화시키며 이에 따른 흙막이벽체와 벽체 배면에 있는 기존 터널 및 배면 지반의 거동특성을 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흙막이벽체에 작용하는 토압은 흙막이벽체 강성에 따라 그 형상이 다르게 나타나며 흙막이벽체 두께가 얇은 경우(2 mm) 흙막이벽체 높이의 0.3H 부근에서 토압이 최대로 나타났으며 흙막이벽체 두께가 두꺼운 경우(5 mm) 흙막이벽체 높이의 0.6H~0.7H 부근에서 토압이 가장 큰 것으로 나타났다.
2. 흙막이벽체의 강성이 증가할수록 흙막이벽체의 변형은 감소하는 경향을 보였으며, 터널이 흙막이벽체에 인접할 경우 터널의 내공변위는 증가하는 반면 흙막이벽체의 변형은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상을

통해 기존터널이 흠막이벽체에 인접할 경우 흠막이벽체의 변형보다 기존터널의 변형에 더 주의를 기울이고 보강이 이루어져야 한다고 판단된다.

3. 흠막이벽체 배면지반의 지표침하하는 흠막이벽체 강성이 증가할수록 인접 지표변위는 감소하는 경향을 보였으며 영향거리의 터널이 없는 경우 0.9H, 터널이 있는 경우 이격거리가 가까울수록 영향거리가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 흠막이벽체의 수평변위 발생으로 인한 지반손실로 인해 지표침하가 발생하는데 터널이 있는 경우 터널 내공변위는 증가하나 터널 자체의 강성으로 인해 지표침하를 억제하는 현상에 기인한 것으로 판단된다.
4. 흠막이벽의 수평변위량은 흠막이벽의 강성이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 흠막이벽이 연성인 경우 터널의 이격거리가 가까울수록 수평변위량이 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 흠막이벽 강성이 클수록 버팀대와 버팀대 사이의 변형이 작아져 흠막이벽체의 수평방향 변형이 감소하는 것으로 판단되며, 터널이 연성 흠막이벽에 인접하여 있는 경우 굴착 시 터널 라이닝의 강성으로 인해 흠막이벽에 작용하는 토압이 감소하여 수평변위가 줄어든다고 판단된다. 그러나 반대로 터널의 내공변위가 증가하고 부재력이 증가하므로 흠막이벽의 강성이 약할수록 터널의 거동에 주의를 기울이고 보강이 이루어져야 할 것으로 판단된다.
5. 흠막이벽체 단계별 굴착에 따른 터널의 내공변위는 터널이 위치하는 4단계 굴착부터 변위가 발생하기 시작하였으며 최종 9단계 굴착 후 천단부는 침하하였고 터널 측벽 및 하부는 흠막이벽체 방향으로 찌그러지는 형상이 나타났으며 흠막이벽체와 터널의 이격거리가 가까울수록 내공변위가 크며 흠막이벽체의 강성에 따른 변화량 차이가 뚜렷하게 나타났다.

이상과 같이 실내모형시험 결과 흠막이벽체의 강성 및 터널의 이격거리에 따른 인접터널과 흠막이벽체 그리고 지표변위 영향을 종합적으로 평가하면 흠막이벽체 강성에 따라 흠막이벽에 작용하는 토압분포 형상이 다르게 나타났으며, 흠막이벽체 강성이 증가할수록 흠막이벽체 변형 및 터널 내공변위, 지표변위가 감소하였다. 또한, 흠막이벽체와 터널의 이격거리가 가까울수록 터널 내공변위는 증가하는 반면 흠막이벽체의 변형은 감소하는 경향을 보였다. 따라서 기존터널에 인접하여 흠막이굴착을 수행할 경우 흠막이벽체의 변형도 중요하지만 터널내공변위에 더 큰 주의를 기울이고 설계단계에서부터 검토가 이루어져 터널의 적절한 보강을 실시한 후 흠막이벽체 굴착이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

1. Back, S.H. (2002), A behavior of braced wall and adjacent ground with the preloading and wall stiffness, Master Thesis, Ajou University, pp. 31-33.
2. Choi, Y.J. (2013a), "A study on the behavior of the adjacent tunnel due to the deformation of bracing", Proceedings of the KTA 2013 Fall Symposium, November 01, 2013, pp. 67-70.
3. Choi, Y.J. (2013b), Behavior of a tunnel adjacent to the cut-off wall due to the deformation of bracing, Master Thesis, Ajou University, pp. 1-5.

4. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), "Structural design models for tunnels in soft soil", *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246-259.
5. Kim, I., Lee, S.D. (2007), "Behavior of tunnel under the influence of pre-loading on braced wall during the adjacent ground excavation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 4, pp. 331-341.
6. Lee, J.M. (2010), "Behavior of building lower part passage tunnel due to adjacent ground excavation", *Journal of Korean Tunnel and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 5, pp. 369-377.
7. Yoo, C.S., Kim, Y.J. (2000), "Behavior of propped walls during deep excavation", *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 3C, pp. 195-195.