

실내모형시험을 통한 흙막이벽체 버팀대 변형에 따른 흙막이벽체 및 인접터널의 거동

안성주^{1*} · 이상덕²

¹정회원, 삼성물산 건설부문 인프라사업부 책임

²정회원, 아주대학교 건설교통시스템공학과 교수

Behavior of wall and nearby tunnel due to deformation of strut of braced wall using laboratory model test

Sung Joo Ahn^{1*} · Sang Duk Lee²

¹Design Manager, Infra Structure Business Unit, Samsung C&T Corporation

²Dept. of Civil and Transportation Engineering, Ajou University

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

Abstract

If a problem occurs in the strut during the construction of the braced wall, they may cause excessive deformation of the braced wall. Therefore, in this study, the behavior of the braced wall and existing tunnel adjacent to excavation were investigated assuming that the support function of strut is lost during construction process. For this purpose, a series of model test was performed. As a result of the study, the earth pressure in the ground behind wall was rearranged due to the deformation of the braced wall, and the ground displacements caused the deformation of adjacent tunnels. When the struts located on the nearest side wall from the tunnel were removed, the deformation of the braced wall and the tunnel deformation were the largest. The magnitude of transferred earth pressure depended on the location of tunnel. The increase of the cover depth of tunnel from 0.65D to 2.65D caused the increase of the earth pressure by 25.6%. As the distance between braced wall and tunnel was increased from 0.5D to 1.0D, the transferred earth pressure increased by 16% on average. Horizontal displacements of braced wall by the removal of the strut tended to concentrate around the removed struts, and the horizontal displacement increased as the strut removal position is lowered. The tunnel displacement was maximum, when the cover depth of tunnel was 1.15D and the horizontal distance between braced wall and the side of tunnel was 0.5D. The minimal displacement occurred, when the cover depth of tunnel was 2.65D and the horizontal distance between braced wall and the side of tunnel was 1.0D. The difference between the maximum displacement and the minimum displacement was about 2 times, and the displacement was considered to be the largest when it was in the range of 1.15D to 1.65D and the horizontal distance of 0.5D.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(3)593-608(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.3.593>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 19, 2018

Revised March 2, 2018

Accepted March 21, 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

Keywords: Braced wall, Adjacent construction, Deformed strut, Model test, Tunnel

초 록

흙막이벽체 시공 중 버팀대에 문제가 발생하여 변형되거나 제 기능을 상실하게 되면 흙막이벽체에 과다한 변형의 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 모형시험을 통해 시공 중 흙막이벽체의 버팀대 일부가 기능을 상실하게 되었을 때 흙막이벽체의 거동특성 및 배면에 인접한 터널의 거동을 파악하고자 하였다. 연구 결과, 흙막이벽체의 변형으로 인해 배면지반의 토압이 재배치되고 지표변위를 발생시켜 인접한 터널의 변형에 영향을 미쳤으며, 터널에서 가장 가까운 측벽에 위치한 버팀대를 제거하였을 때 흙막이벽체 변형 및 터널변형이 가장 크게 나타났다. 터널의 위치에 따른 평균 전이토압은 터널 심도가 0.65D에서 2.65D로 깊어짐에 따라 평균 25.6% 증가하였으며, 흙막이벽체와 터널과의 이격거리가 0.5D에서 1.0D로 증가함에 따라 전이토압이 평균 16% 증가하였다. 버팀대 제거에 따른 흙막이벽체의 수평변위는 제거되는 버팀대 부근에 집중되는 경향을 보였으며 버팀대 제거위치가 하부로 내려갈수록 수평변위는 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 터널 내공변위는 토피고 1.15D, 수평거리 0.5D일 때 최대 내공변위가 발생하였고, 토피고 2.65D, 수평거리 1.0D에서 최소 내공변위가 발생하였다. 가상파괴면이 터널의 중심부를 통과하는 범위인 토피고 1.15~1.65D, 수평거리 0.5D에서 터널의 내공변위가 크게 증가하는 것으로 검토되었으며, 최대 내공변위와 최소 내공변위의 차이는 약 2배 정도 발생하였다.

주요어: 흙막이벽체, 근접시공, 버팀대 기능상실, 실내모형실험, 터널

1. 서론

고도의 산업발전과 경제성장에 따른 도심지 경제활동의 집중 현상과 이로 인한 과도한 인구집중현상은 사회간접자본시설의 확충을 요구하게 되었다. 또한 도시가 과밀화, 거대화되면서 고층빌딩의 증가는 물론 지하철, 경전철 등과 같은 새로운 교통수단이 도입되면서 깊은 심도의 굴착이 빈번해지고 있다. 일반적으로 흙막이공법 적용 시 주변에 기존 터널이 존재하는 경우 터널에 영향이 없도록 충분히 이격하여 굴착하는 경우가 대부분이다. 하지만 최근 들어 도심지에 대규모·대심도 지하굴착 사례가 증가하고 있으며, 특히 복잡한 지하철 노선이 중복되는 구간의 경우 여러 개의 터널이 교차되고 굴착 영향범위 내에 대형건물이 건설되는 경우도 발생하고 있다. 앞으로 더욱 대규모 지하공간 개발과 대도시의 복잡한 개발이 예상되므로 기존지하구조물에 인접하여 흙막이 공사를 수행하는 근접시공이 증가 할 것으로 판단되며, 해외에서는 이미 이러한 사례가 보고되어지고 있다(Hwang et al., 2011). 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, 2013). 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 and Lee, 2010). 특히 인접구조물에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 배면

지반의 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(Kim and Lee, 2007), 벽체 배면지반에 그라우팅을 실시하여 지반의 강도를 증가시킴으로 배면토압을 줄이는 방법 등이 적용되고 있다(Choi, 2013).

따라서 본 논문에서는 흙막이벽체의 거동에서 가장 큰 영향을 미치는 수평변위에 의한 영향을 파악하기 위하여 기존터널에 인접하여 지반굴착이 이루어질 때 흙막이벽체 버팀대의 기능상실 시 흙막이벽체와 인접터널의 거동을 분석하고자 하였다. 본 연구의 목적은 흙막이벽체의 버팀대를 위치별로 제거하여 흙막이벽체와 지반의 거동 특성을 파악하고, 벽체 배면에 인접하여 위치한 터널에 미치는 영향을 분석하여 터널의 취약부를 알아보고 향후 적절한 보강 대책을 수립하는데 도움이 되고자 하는데 있다. 이를 위해 터널이 지반굴착의 영향범위 내에 있을 경우를 가정하여 모형시험을 수행하였으며, 벽체와 터널 간 이격거리와 토피코가 상호 거동에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 모형시험

2.1 시험개요

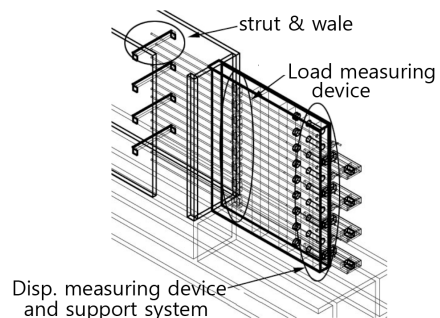
본 논문에서는 기존 터널에 근접하여 흙막이벽 시공 시 버팀대 일부가 기능을 상실할 경우 벽체 변위와 벽체에 작용하는 단면력, 흙막이벽체의 거동과 벽체 배면의 기존터널과 지표침하 등에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내모형시험을 수행하였다. 연구에 적용한 터널의 형상은 터널의 거동특성을 잘 파악할 수 있도록 현장에서 많이 시공되고 있는 마제형이나 난형이 아닌 원형터널로 적용하였다.

2.2 모형시험장치

본 실험을 위한 모형토조는 270 mm × 1700 mm × 1200 mm (폭 × 길이 × 높이)로 제작하였으며, 굴착을 모사하기 위해 100 mm씩 굴착판을 제작하여 탈부착이 가능하도록 하였다. 모형지반 조성은 샌드커튼(sand curtain)



(a) Test equipment



(b) Support and measuring system

Fig. 1. Scheme of the model test equipment (Back, 2002)

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.

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 제작하였고 모형터널은 철판(steel)을 사용하여 제작하였다.

흙막이벽체는 실제 현장에 적용된 System stiffness ($S = EI/r_w h^4$, Clough et al., 1989)가 19.05인 H-pile + 토류 형식의 벽체를 가정하였고, 모형흙막이벽체의 System stiffness는 20.7로 나타났다. 터널은 7.0 m의 직경을 가진 지하철 단선터널을 대상으로 하였으며, 상사법칙을 이용하여 아래와 같이 두께를 산정하였으며, 그 결과는 Table 1과 2에 요약된 바와 같다.

2.3.1 상사율을 이용한 모형 흙막이벽체의 두께 산정

$$t_m = \frac{T}{C} \times \left[\frac{G_m}{G_R} \times \frac{1}{C} \times \frac{E_R}{E_m} \times \frac{B_R}{B_m} \right]^{\frac{1}{3}} \times 1000 \quad (1)$$

여기서, t_m : 모형 흙막이벽체 두께(mm)

C: 상사율

T: 실제 벽체 두께(mm)

G_m (G_R): 실제(모형) 벽체 중력가속도

E_R (E_m): 실제(모형) 벽체 탄성계수(kN/m²)

B_R (B_m): 실제(모형) 벽체 폭

모형터널(Fig. 2)의 크기는 길이(L)에 대한 대응비를 적용하여 실제 터널의 크기(D = 7 m)로부터 상사율 1/30 축척을 고려하여 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 아래식으로 나타낼 수 있으며 그 값은 Table 2와 같다.

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

$$\text{모형터널 강성비} : \alpha = \frac{E_{km}}{E_{bm}} \frac{R^{m^3}}{I_{bm}} \quad (2)$$

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

여기서, $E_k (E_{km})$: 실제(모형)지반의 탄성계수(kN/m³)

$R (R_m)$: 실제(모형)터널 반경(m²)

$E_b (E_{bm})$: 실제(모형)라이닝 탄성계수(kN/m³)

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

$t (t_m)$: 실제(모형) 터널 라이닝 두께(m)

Table 1. Ratio of similitude of braced wall

Item	Real braced wall (H-pile, 300 × 200 × 9 × 14)	Model braced wall
Elastic modulus of wall (kN/m ²)	2.0 × 10 ⁸	1.15 × 10 ⁷
Width of wall (m)	1.0	0.27
Gravitation of acceleration (m/sec ²)	9.8	9.8
Wall thickness (m)	0.3	0.002
Ratio of similitude		30

Table 2. Relative stiffness ratio of model tunnel

Item	Real tunnel lining	Model tunnel lining
Elastic modulus of soil (kN/m ²)	350,000	20,000
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



Fig. 2. Shape of model tunnel

2.4 굴착 영향범위 가정 및 시험변수

흙막이공법 적용 시 주변에 기존 터널이 존재하는 경우 일반적으로 터널에 영향이 없도록 이격하여 굴착하는 경우가 대부분이나 앞으로 대규모 지하공간 개발과 대도시의 복잡한 개발로 지하철, 지하차도 등 기존지하구조물에 상당히 인접하여 흙막이 공사를 수행하는 근접시공이 증가 할 것으로 판단된다.

근접굴착에 따른 기존구조물의 영향범위는 근접도로 나타낼 수 있으며, 영향범위는 Fig. 3 (Choi et al., 2013)와 같이 영향범위 I, II, III 세 부분으로 정의할 수 있다. 수평변위에 의한 영향범위는 단계별 굴착 시 흙막이벽체의 수평 변위에 의해 배면지반이 대수나선형으로 활동파괴된다고 가정하고 모멘트 평형을 적용하여 대수나선 활동파괴면을 측정한다.

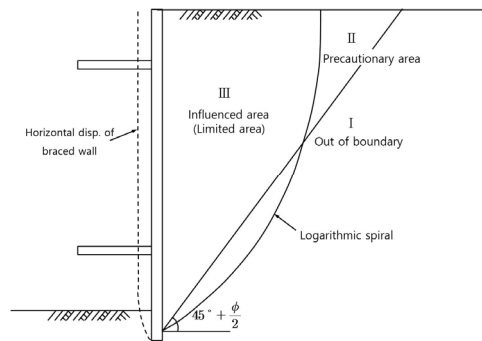


Fig. 3. Influenced area due to adjacent excavation

흙막이벽체의 수평변위가 시작되는 저면을 지나는 평면활동면 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ 를 가정하여 활동파괴면 위치에 따라 터널을 위치시키고 흙막이벽체의 변형으로 인한 수평변위를 발생시켜 인접터널의 거동을 파악하고자 하였다. Fig. 4 (Choi, 2013)의 H는 지표로부터 거리를 터널직경(D)으로 표현(H0 : 0.65D, H1 : 1.15D, H2 : 1.65D, H3 : 2.65D)하였고, D는 흙막이벽체로 부터의 수평이격거리를 터널직경으로 표현(D050 : 0.5D, D075 : D0.75D, D100 : 1.00D)하였다. S는 버팀대의 위치이며 최상단 S1부터 10 cm간격으로 총 8개의 버팀대를 설치하였으며 최하단을 S8로 표현하였다.

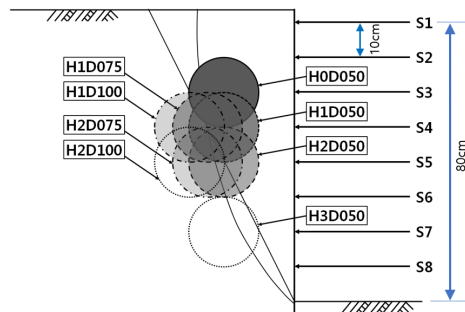


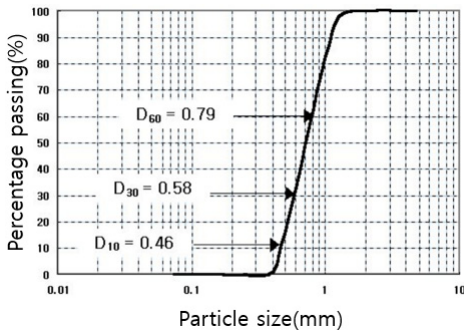
Fig. 4. Case of a model test

2.5 모형지반

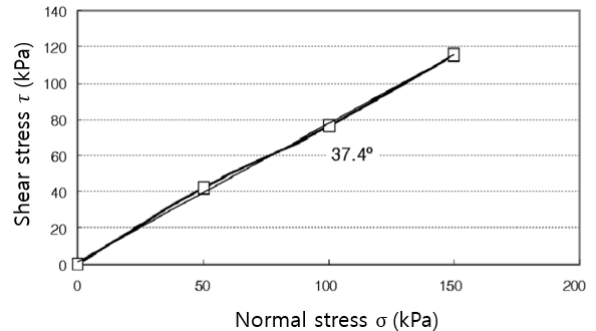
실내모형시험의 지반은 균질하고 등방성인 모래로 시험지반을 조성하였다. 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 낙하고를 조절할 수 있는 샌드커튼(sand curtain) 방식의 강사장치를 사용하여 모형지반을 조성하였다. 모형 시험에 사용된 강사장치는 270 mm × 300 mm × 1300 mm (폭 × 길이 × 높이)의 크기로 강사고를 일정하게 유지하기 위하여 측면에 롤러를 부착하여 토피고 증가에 따라 강사기 위치가 상향으로 이동되도록 하였으며, 강사장치 하부에도 롤러를 부착하여 강사레일을 따라 자유롭게 이동하도록 제작하였다. 모형지반의 상대밀도는 59.5%로 Table 4에 나타난 바와 같이 중간조밀 정도에 해당하며 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. 5는 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	16.4 kN/m ³	59.5%	37.4	0



(a) Grain size accumulation curve



(b) Result of direct shear test

Fig. 5. Grain size accumulation curve of model ground and result of direct shear test

Table 4. Relative density description (Lee, 2014)

Condition	Very loose	Loose	Medium	Dense
Relative density (D_r , %)	-	0~33	33~67	67~100

2.6 계측

본 실내모형시험에서는 흙막이 벽체, 기존 터널, 지표침하의 거동을 분석하기 위해 각각의 위치에 계측기를 설치하였으며, 시험이 진행되는 동안 각 굴착단계별로 자동 및 수동 계측되어 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

2.6.1 흙막이벽체

흙막이벽체의 수평변위는 지반조성 전에 흙막이벽체 상단 50 mm하부에서부터 심도별 100 mm간격으로 8개의 변위계와 흙막이벽체를 설치하고 지반이 조성된 후 초기치를 설정하고 굴착 및 흙막이벽체의 변형에 따른 변위를 측정하였다(Fig. 1(b)).

2.6.2 터널

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.

2.6.3 지표침하

지표침하는 각각의 경우에 대해 지반조성이 완료된 후 흙막이벽에서 50 mm 이격된 곳부터 100 mm간격으로 10개의 변위계를 설치하여 초기치를 설정하고 굴착 및 흙막이벽체의 변형에 따른 지표변위를 측정하였다.

2.7 실험 변수

흙막이벽체의 수평거동에 영향을 미치는 요소 중 흙막이벽체와 터널의 심도 및 이격거리를 변화시켜가며 단계별 굴착을 실시한 후 위치별로 버팀대를 제거하여 모형시험을 수행하였다(Table 5).

2.8 실험 방법

본 실내모형시험은 버팀대 기능상실에 따른 흙막이벽체와 인접터널의 거동을 파악하기 위한 실험으로 다음과 같은 순서로 시험을 진행하였다. 지반 조성 전에 흙막이벽체를 소정의 위치에 고정된 후 강사장치를 설치하여 지반을 조성한다. 모형지반은 샌드커튼 방식으로 조성하였고, 이때 강사고 90 cm를 유지하며 10 cm씩 지반을 조성하였다. 모형터널 바닥부까지 지반 조성 후 터널의 위치를 고정하고 동시에 내공변위계를 설치하였다. 이후 벽체의 상단, 즉 지표면까지 지반을 조성한 후 단계별 굴착을 진행하였다. 총 8단 굴착으로 각 단계별로 굴착 완료 후 5분의 안정화 시간을 주고 버팀대를 벽체에 밀착시키면서 모형시험을 수행하였다. 굴착완료 후 실험 case별로 소정의 위치의 버팀대를 제거하면서 시험을 수행하였다. 이러한 시험과정은 각 시험변수별로 동일한 순서로 반복하였다.

Table 5. Test variables and cases

Distance between tunnel side wall and braced wall	Soil cover depth of tunnel	Number of removed strut	Cases
0.50D	0.65D	STRUT 1	H0D050S1
		·	·
	1.15D	STRUT 8	H0D050S 8
		·	·
	1.65D	STRUT 1	H1D050S1
		·	·
	2.65D	STRUT 8	H1D050S 8
		·	·
0.75D	1.15D	STRUT 1	H2D050S1
		·	·
	1.65D	STRUT 8	H2D050S 8
		·	·
	2.65D	STRUT 1	H3D050S1
		·	·
	1.15D	STRUT 8	H3D050S 8
		·	·
1.00D	1.15D	STRUT 1	H1D075S1
		·	·
	1.65D	STRUT 8	H1D075S8
		·	·
1.00D	1.15D	STRUT 1	H2D075S1
		·	·
	1.65D	STRUT 8	H2D075S8
		·	·
1.00D	1.15D	STRUT 1	H1D100S1
		·	·
	1.65D	STRUT 8	H1D100S8
		·	·
1.00D	1.15D	STRUT 1	H2D100S1
		·	·
	1.65D	STRUT 8	H2D100S8
		·	·

3. 결과분석

본 논문에서는 흙막이벽체 굴착을 단계별로 적용하여 굴착단계별 흙막이벽체의 수평변위와 부재력, 기존 터널의 내공변위 그리고 흙막이벽체 배면지반의 지표침하에 대하여 실내모형시험을 실시한 후 흙막이 공사 시 혹은 발생할 수 있는 버팀대의 기능상실 상태를 구현하기 위하여 흙막이벽체의 버팀대를 위치별로 제거한 후 흙막이벽체의 거동과 인접터널에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 흙막이벽체

3.1.1 흙막이벽체 변형에 따른 전이토압

흙막이벽체의 위치별로 버팀대를 제거함으로써 흙막이벽체의 변형을 발생시켜 제거된 버팀대로 인해 주변으로 전이되는 토압을 분석하였으며 아래 Fig. 6은 전이토압이 가장 크게 발생한 S7 버팀대를 제거했을 때 터널 토파고별, 이격거리별 전이토압을 나타내었다. Fig. 6(a)와 6(b)는 터널 토파고가 1.15D (H1)일 경우와 1.65D (H2)일 경우 이격거리를 0.5D, 0.75D, 1.0D로 변화함에 따른 전이토압을 나타내었으며, (c)는 흙막이벽체와 터널의 이격거리가 0.5D인 경우 터널의 토파고 변화(0.65~2.65D)에 따른 전이토압을 나타내었다.

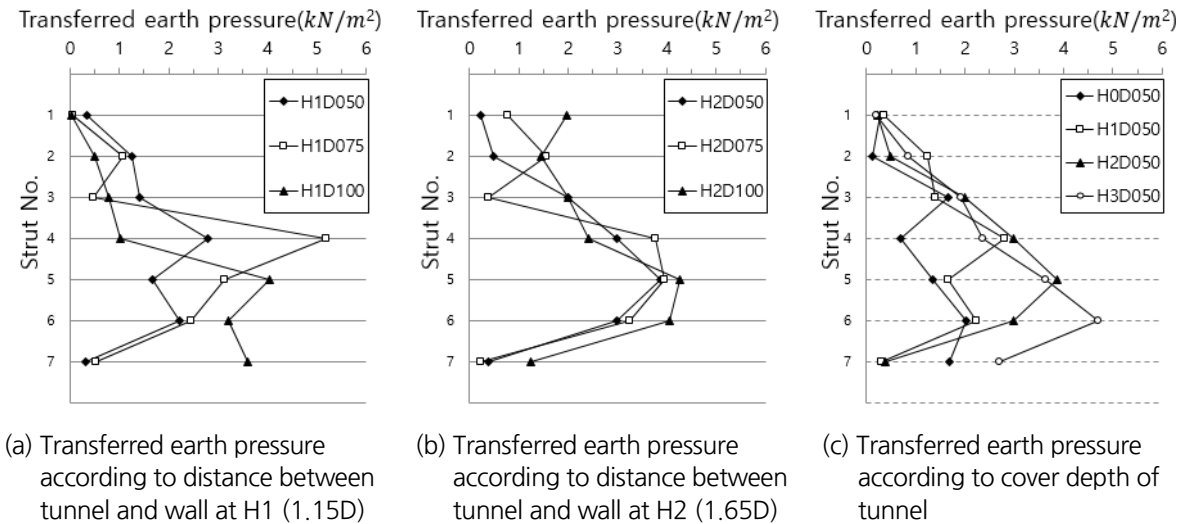


Fig. 6. Transferred earth pressure due to the removal of strut load depending on tunnel location

전이토압이 H0 (0.65D)에서는 3번째와 6번째 버팀대를 제거하였을 때 크게 나타나며 H1 (1.15D)에서는 4번째, H2 (1.65D)에서는 5번째, H3 (2.65D)에서는 6번째에서 크게 나타났다. 터널의 심도가 H0 (0.65D)에서 H3 (2.65D)으로 깊어지면서 터널측벽에 위치한 버팀대가 3번째, 4번째, 7번째로 변화하는데 전이토압은 터널의 측벽부의 흙막이벽체에 변형이 발생했을 때 가장 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, 그 이유는 터널 심도가 깊을수록 터널에 작용하는 하중이 커져 버팀대 기능상실로 인해 벽체와 터널사이의 지반응력이 해방되면서 이부분의 전이하중이 인접 버팀대로 전이되는 현상으로 판단된다. 또한, 터널 측벽 또는 하부에서 지반변형이 발생했을 경우 터널에 급격한 변형이 발생하며 터널이 없는 경우보다 더 큰 전이토압이 발생하는 것으로 검토되었다. 흙막이벽체와 터널의 이격거리가 멀어지는 경우에도 H1 (1.15D)에서는 평균 16.14%, H2 (1.65D)에서는 평균 15.69%씩 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7).

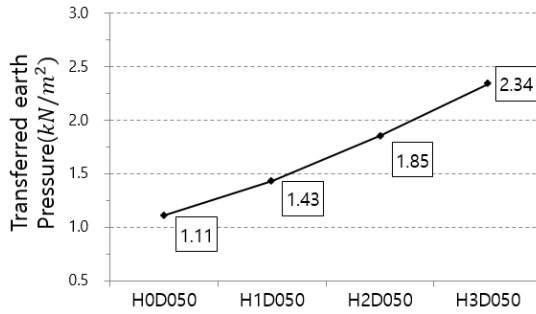


Fig. 7. Distribution of transferred earth pressure by a cover depth of tunnel

터널이 흙막이벽체 높이 1/2~2/3지점에 위치하고 터널의 이격거리가 1.0D 이내일 때 터널 측면에 흙막이벽체 변형이 발생하는 경우 터널 및 흙막이벽체 안정성이 가장 취약할 것으로 판단되며 흙막이벽체 변형과 터널의 거동 형상을 분석하여 이를 설계 및 시공에 반영하여 혹시 발생할 수 있는 사고를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 흙막이벽체의 수평변위

흙막이벽체를 설치하고 지반을 실제와 유사하게 굴착을 실시한 후 버팀대를 제거하여 발생하는 흙막이벽체의 수평변위를 Fig. 8에 표현하고 각 실험변수에 대한 수평변위 최대값을 점선으로 표시하였다. 수평변위의 최대값은 H0 (0.65D)에서 3번째와 6번째 버팀대를 제거하였을 때 크게 나타나며 H1 (1.15D)에서는 4번째, H2 (1.65D)에서는 5번째, H3 (2.65D)에서는 7번째에서 크게 나타났다. 터널의 심도가 H0 (0.65D)에서 H3 (2.65D)으로 깊어지면서 터널측벽에 위치한 버팀대가 3번째, 4번째, 5번째, 7번째로 변화하는데 수평변위는 터널 측벽부와 가장 인접한 부분의 버팀대가 제거되었을 때 가장 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

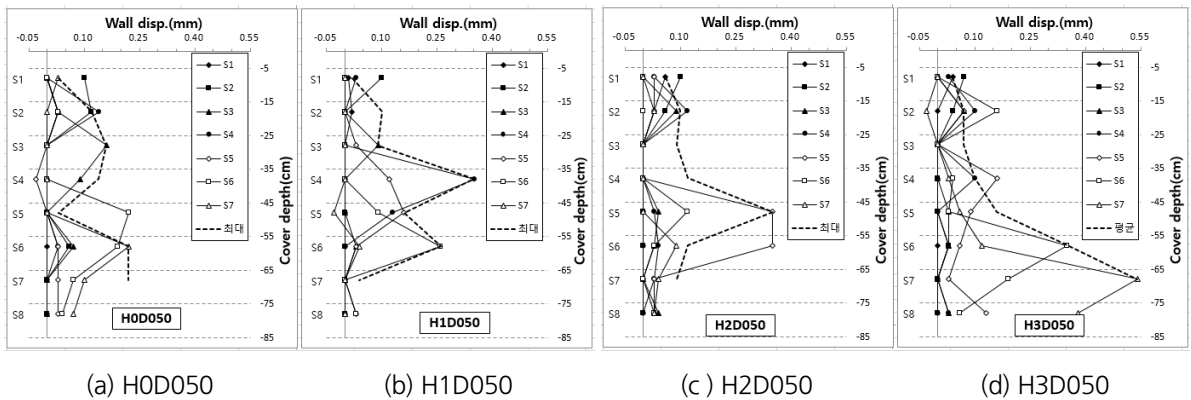


Fig. 8. Horizontal displacements due to removal of strut load depending on cover depth of tunnel

3.2 터널의 내공변위

흙막이벽체 변형에 따른 터널의 내공변위를 Fig. 9에 나타내었다. 흙막이벽체 변형에 의한 터널의 내공변위 형상은 천단부가 침하되며 우측벽 또는 우측하부로 찌그러지는 형상으로 나타났으며 우측은 흙막이벽체 측이므로 흙막이벽체의 수평변위에 따라 천단부가 침하되면서 흙막이벽체 측으로 변형되는 것으로 확인되었다. 이는 흙막이벽체 버팀대가 기능을 상실하여 지반변형이 발생할 경우 천단부에 비해 스프링라인 하부쪽 변형이 더 크게 나타나며, 터널의 토피코가 클수록, 이격거리가 가까울수록 내공변위가 더 커지는 경향을 보인다.

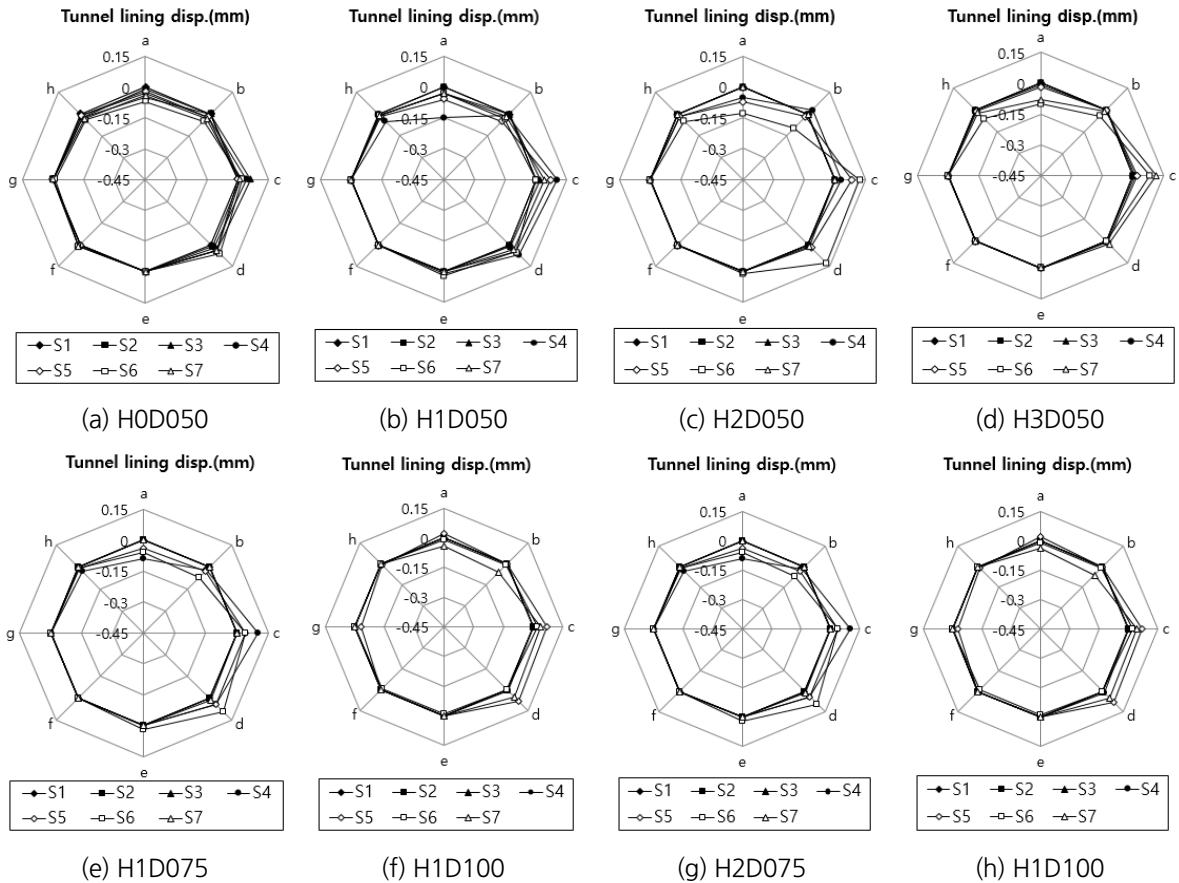
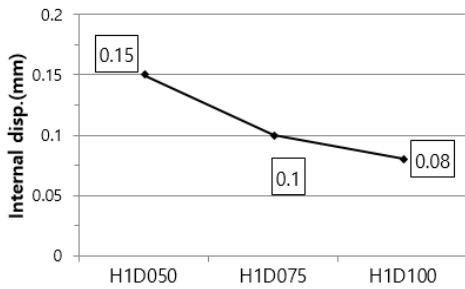


Fig. 9. Internal displacements of tunnel due to removal of strut load

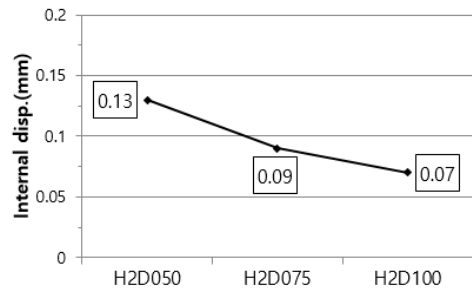
내공변위는 H0 (0.65D)에서 3번째와 6번째 버팀대를 제거하였을 때 크게 나타나며 H1 (1.15D)에서는 4번째, H2 (1.65D)에서는 6번째, H3 (2.65D)에서는 7번째에서 크게 나타났다. 터널의 심도가 H0 (0.65D)에서 H3 (2.65D)으로 깊어지면서 터널측벽에 위치한 버팀대가 3번째, 4번째, 5번째, 7번째로 변화하는데 내공변위는 터널 측벽 혹은 측하부의 흙막이벽체에 변형이 발생했을 때 가장 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 이를 통해 흙막

이 벽체 버팀대가 기능을 상실할 경우 터널에 가장 큰 영향을 미치는 위치는 터널의 측벽 하부임을 알 수 있다.

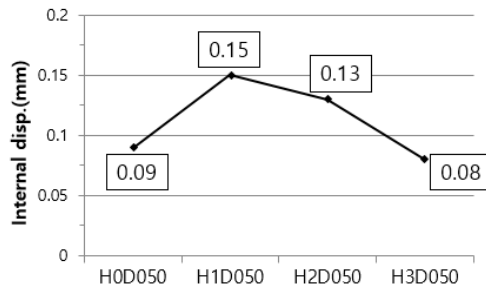
터널 위치별 내공변위 최대값을 기준으로 터널의 심도가 깊어질수록 내공변위는 평균 25.89% 감소하는 경향을 나타내었고, 흙막이벽체와 터널의 이격거리가 멀어지는 경우에도 H1 (1.15D)에서는 평균 26.67%, H2 (1.65D)에서는 평균 26.49%씩 감소하는 경향을 보였다.



(a) Internal disp. due to the distance between tunnel and braced wall (H1)



(b) Internal disp. due to the distance between tunnel and braced wall (H2)



(c) Internal disp. due to the tunnel cover depth

Fig. 10. Maximum tunnel displacement depending on cover depths of tunnel and distances between tunnel and braced wall

3.3 배면지반의 지표변위

흙막이벽체 변형에 따른 배면지반의 지표변위를 Fig. 11에 나타내었다. 상부 흙막이벽체 변형에 의한 지표변위는 흙막이벽체 인접부근에 집중되는 경향을 보이며 흙막이벽체의 변형위치가 하부로 변화할수록 변위영역이 넓어지는 것을 확인하였다. 이는 버팀대를 제거하는 위치가 내려갈수록 지반 내 변형 영향범위가 넓어져 지표에 미치는 영향이 벽체에서 멀리까지 영향을 미치는 것으로 판단된다.

굴착 시 흙막이벽체의 버팀대 기능상실로 발생하는 수평변위는 배면에 있는 지반을 이완시키고, 배면 지반은 수평변위가 발생하는 동안 서서히 압축되어 지표침하를 발생시킨다. 지표침하 발생경향은 터널 토피고가 깊어질수록 지표침하 발생범위와 크기가 증가되는 경향을 보였으며, 흙막이벽체와 터널과의 이격거리가 멀어질 경우 지표침하 영향범위도 흙막이벽체에서 멀리까지 분포하는 경향을 보였다.

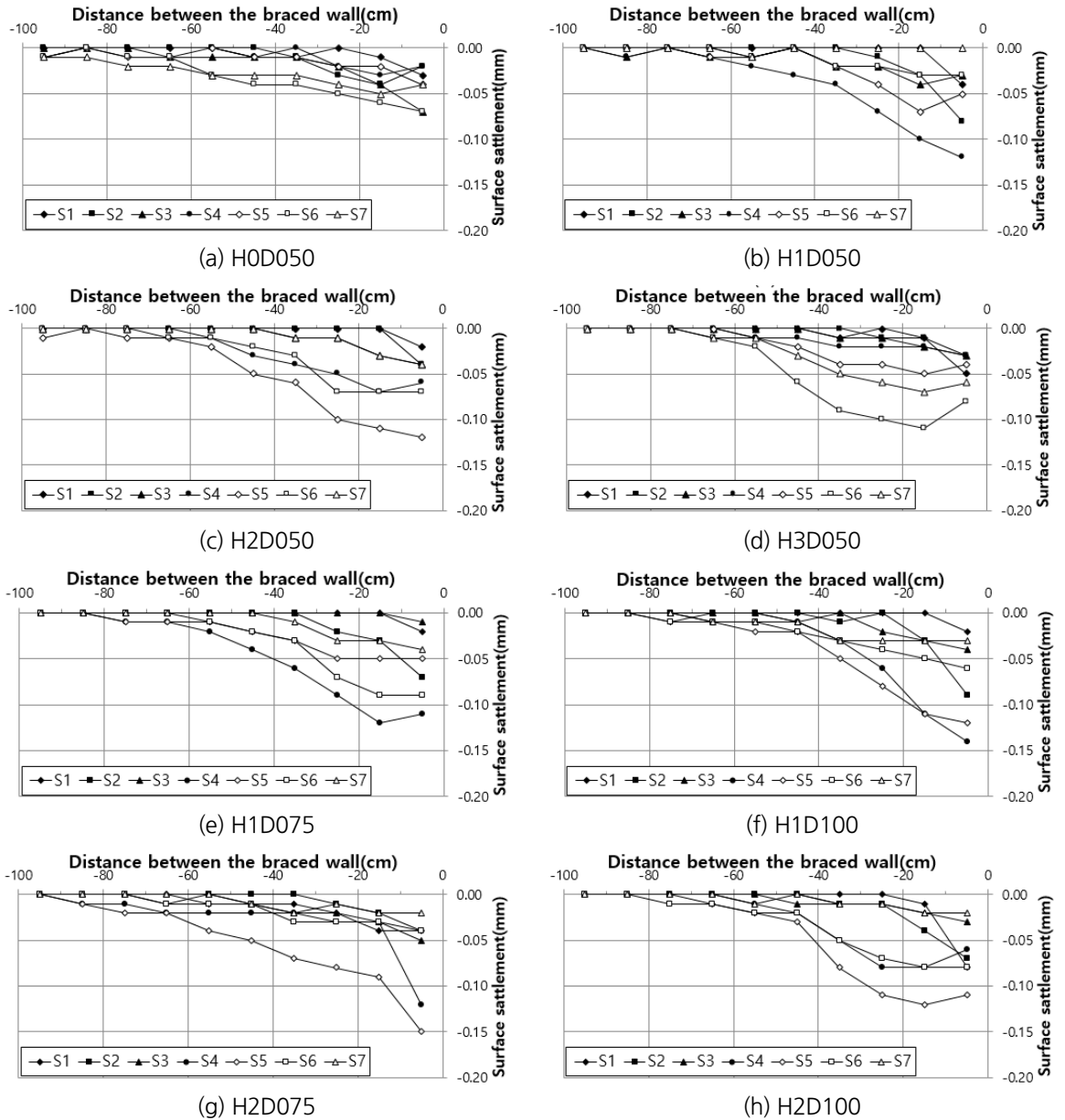


Fig. 11. Surface settlements of the ground due to deformation of the braced wall by the location of tunnel

4. 결론

본 논문에서는 기존 터널에 인접한 터파기 공사에서 공사 중 흙막이벽체 버팀대의 기능상실 위치에 따라 흙막이벽체와 벽체 배면에 있는 기존 터널 및 배면 지반의 거동특성을 파악하고 흙막이벽체의 변형위치별 인접한 터널이 받는 영향관계를 확인하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흠막이벽체의 변형은 배면지반의 토압을 재배치시키고 지표변위를 발생시켜 인접한 터널의 변형에 영향을 미쳤으며, 흠막이벽체 높이의 2/3 지점의 버팀대를 제거하였을 때 흠막이벽체 변형 및 터널변형이 가장 큰 것으로 나타났다.
2. 버팀대에 작용하는 하중을 제거함에 따라 흠막이벽체에 변형이 발생하며 버팀대가 지지하던 토압은 주변 버팀대로 전이되는 경향을 보였으며, 이러한 전이토압은 터널에서 가장 가까운 측벽에 위치한 버팀대 제거 시 가장 크게 나타났다. 터널의 위치에 따른 평균 전이토압은 터널의 심도가 깊어지고 흠막이벽체와의 이격거리가 멀어질수록 증가하는 경향을 보였다. 그 이유는 터널이 가상파괴면 내에 있을 경우 터널의 내공변위는 증가하나 라이닝의 강성으로 인해 지반변형을 억제하는 효과가 있는 것으로 사료된다. 전이토압은 터널의 심도가 깊어짐에 따라 평균 26% 증가하였으며, 흠막이벽체와 터널과의 이격거리가 0.5D에서 1.0D로 증가함에 따라 약 16% 증가하였다.
3. 흠막이벽체 배면지반의 지표변위는 흠막이벽체 변형이 하부로 이동할수록 변위영역이 넓어지는 경향을 보였다. 토피고 1.65D, 이격거리 0.75D에서 터널 측벽부 흠막이벽체 버팀대를 제거했을 경우 지표변위가 가장 크게 발생하였으며, 터널 토피고가 깊어질수록 지표침하 발생범위와 크기가 증가되는 경향을 보였으며, 흠막이벽체와 터널과의 이격거리가 멀어질 경우 지표침하 영향범위도 흠막이벽체에서 멀리까지 분포하는 경향을 보였다.
4. 버팀대 제거에 따른 흠막이벽체의 수평변위는 제거되는 버팀대 부근에 집중되는 경향을 보였으며 버팀대 제거위치가 아래로 내려갈수록 수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 터널이 가상파괴면 내에 50%이상 포함되고 이격거리가 가까운 경우(토피고 1.15~1.65D, 이격거리 0.5D) 터널의 내공변위가 크게 발생하였으며, 가상파괴면에서 멀어질수록 내공변위가 작게 발생하였다. 그리고 최대 내공변위와 최소 내공변위의 차이는 약 2배 정도 발생하였다.

본 연구의 지반은 중간조밀 정도의 사질토 지반이며 실제 현장의 다양한 지반조건과 지반상태에 따라 터널 및 흠막이 벽체의 거동특성이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 지반조건을 달리하여 시험을 수행하고 실제 현장 계측 결과를 비교, 분석하면 좀더 구체적인 지반의 거동특성을 파악할 수 있을 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., Park, B.S., Lee, S.D. (2013), "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. (2013), Behavior of a tunnel adjacent to the cut-off wall due to the deformation of bracing, Master Thesis, Ajou University, pp. 31-35.

4. Clough, G.W., Smith, E.M., Sweeney, B.P. (1989), "Movement control of excavation support systems by iterative design", *Proceedings of the ASCE Foundation Engineering: Current Principles and Practices*, 2, pp. 869-884.
5. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), "Structural design models for tunnels in soft soil", *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246-259.
6. Hwang, R. N., Duann, S.W., Cheng, K.H., Chen, C.H. (2011), "Damages to metro tunnels due to adjacent excavations", *Proceedings of the International Symposium on Backward Problems in Geotechnical Engineering*, TC302, Osaka 2011, pp. 83-88.
7. 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.
8. Lee, J.M., Lee, S.D. (2010), "Behavior of building lower part passage tunnel due to adjacent ground excavation", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, No. 5 pp. 369-377.
9. Lee, S.D. (2014), *Soil Mechanics*, CIR, Seoul, pp. 353-354, 388-396.