

# 굴착방법에 따른 구조물의 손상도 평가

전재현<sup>1</sup> · 박종덕<sup>2</sup> · 임영덕<sup>3</sup> · 이석원<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사

<sup>2</sup>비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국전력공사, 개발사업본부 송변전건설처 처장

<sup>4</sup>정회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 교수

## Damage assessment of structures according to the excavation methods

Jae-Hyun Jeon<sup>1</sup>, Jong-Deok Park<sup>2</sup>, Young-Duck Lim<sup>3</sup>, Seok-Won Lee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

<sup>2</sup>Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master Student

<sup>3</sup>KEPCO, Project Division, Transmission Project Department, Manager

<sup>4</sup>Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Professor

**ABSTRACT:** When the ground is excavated near the pre-existing structures due to the region restricted condition such as urban area, the ground will be released by the excavation and the temporary wall will be deformed depending on the earth pressure. In this case, issues can be created in terms of stability of pre-existing structures. Firstly, the laboratory model tests were carried out to investigate the ground surface settlement due to the ground excavation according to the excavation methods in this study. Using the ground surface settlement results from model tests, numerical analyses were carried out to study the structure deformation due to the ground excavation according to the excavation methods. Finally, using the structure deformation results from numerical analysis, the damage assessment of structures was carried out by using the strain damage estimation criterion.

**Keywords:** Damage assessment, Ground excavation method, Horizontal wall displacement, Surface settlement, DEM

**요 지:** 도심지와 같이 개발가능한 지역이 제한되어 있으면 기존 건물에 인접하여 지반을 굴착하는 경우가 종종 발생한다. 이러한 경우 지반은 이완되고 따라서 토압에 따라 가시실 벽체에 변형이 발생하므로 인접 구조물의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실내 모형실험을 통하여 여러 가지 형태의 지반 굴착방법에 따른 인접 지반의 지표면 변위를 산정하고, 이를 수치해석에 적용하여 지표면 침하에 따른 구조물의 변형 양상을 연구하였다. 이렇게 얻어진 구조물 변형 형상 중에서 각 변위와 수평 변형율을 추출하여 최종적으로 인접 구조물의 손상 정도를 평가하였다.

**주요어:** 손상도 평가, 지반 굴착방법, 벽체 수평변위, 지표 침하, 개별요소법

## 1. 서 론

최근에는 건물의 기초 공사, 지하철 및 지하차도 같은 지하 구조물의 건설이 기존 구조물에 초 근접하여 건설되는 근접시공이 도심지 내 굴착 공사의 대부분을 차지하고 있다. 도심지 근접시공의 경우 굴착에

의한 흙막이벽체 자체의 안정성뿐만 아니라, 인접지반 및 구조물에 미치는 영향에 대해서도 다각적이고 정밀한 분석이 필요하다. 따라서 기존 구조물의 안정성 확보를 위해서는 지반 굴착 시 인접 지반 및 구조물의 침하를 최소화 할 수 있는 기법의 적용이 필요하며, 필연적으로 발생하는 지표 침하에 의한 인접 구조물의 손상 정도를 정량적으로 파악하여 대비하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 여러 가지 형태의 지반 굴착방법에 따른 인접 구조물의 손상 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 실내 실험 및 수치 해석적 연구를

\*Corresponding author: Seok-Won Lee

E-mail: swlee@konkuk.ac.kr

Received March 20, 2013; Revised March 25, 2013;

Accepted March 28, 2013

통하여 다음과 같이 3단계로 연구를 수행하였다.

1단계 연구로서, 여러 가지 형태의 지반 굴착방법에 따른 인접 지반의 지표면 변위를 산정하기 위해서 실내 모형실험을 수행하였다. 지반 굴착에 따른 벽체 변위는 다양한 원인에 의해 발생한다. Cording (1984)은 벽체 변위 발생 원인에 대해 3가지를 언급하였다. 첫째 원인은 지반과 벽체의 상호작용에 의하여 발생

하고, 둘째는 벽체 자체의 침하, 셋째는 벽체를 통하여 유실되는 토사에 의해 지반 변위가 발생한다고 제시하였다. Milligan (1974)은 굴착 벽의 처짐 형상에 대해 캔틸레버 모델과 벌징 모델로 제시하였다. 현장 계측에 의하면 최대지반수평변위/지반침하의 비는 캔틸레버 모델에서 약 1~1.5이고 벌징 모델에서는 0.5~1.0인 것으로 나타났다. Yun (2008)은 Fig. 1과

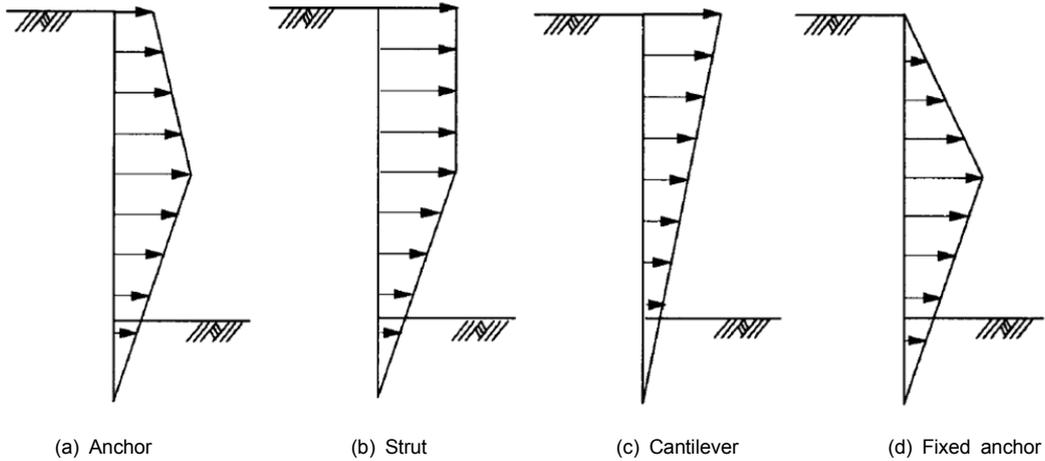


Fig. 1. Shape of wall deflection (Yun, 2008)

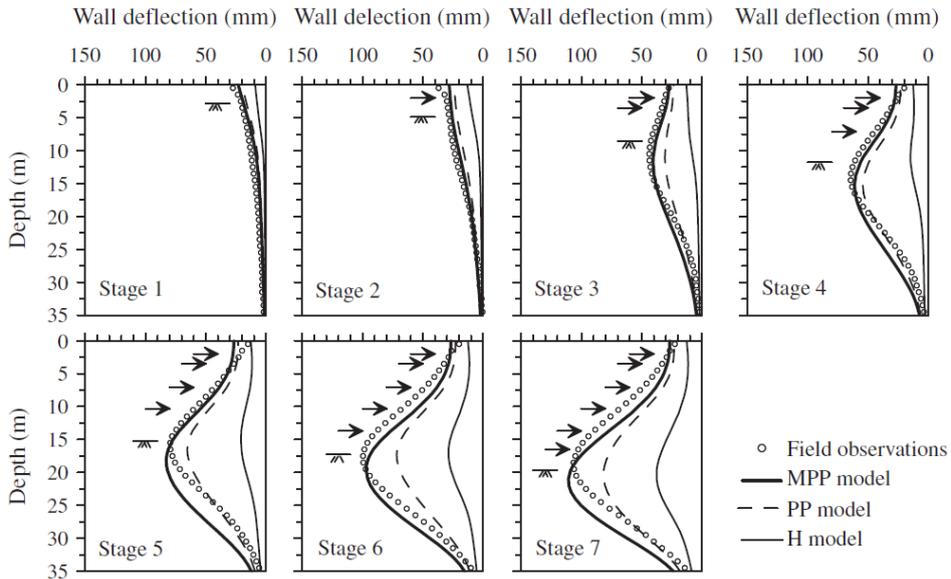


Fig. 2. Construction sequence model (Tang and Kung, 2010)

같이 여러 가지 굴착공법에 따른 흙막이 벽의 변형형상을 4가지로 가정하여 배면지반의 변형을 수치해석적 연구로 예측하였다. Tang and Kung (2010)은 Fig. 2와 같이 3가지 지반 모델(MPP model, PP model, H model)을 이용한 시공단계별 수치해석 결과와 현장 계측 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에서는 여러 가지 형태의 지반 굴착방법을 모사하기 위하여 Yun (2008)의 강제변위법에서 제시한 4가지 벽체 변형

형상(Fig. 1에서 앵커모델, 스트리트모델, 캔틸레버모델, 상부고정앵커모델)과 더불어 시공단계별 지표 침하량을 분석하기 위하여 Tang and Kung (2010)이 제시한 굴착과 지보에 따른 시공단계별 벽체의 변형량을 일반화한 벽체 변형 형상(Fig. 2에서 시공단계별 모델)을 실내 모형실험에 적용하였다. 즉 총 5가지 형태의 벽체 변위 양상을 실내 모형실험에 적용하여 각각의 지표 침하량을 산정하였다. 굴착 시에 인접

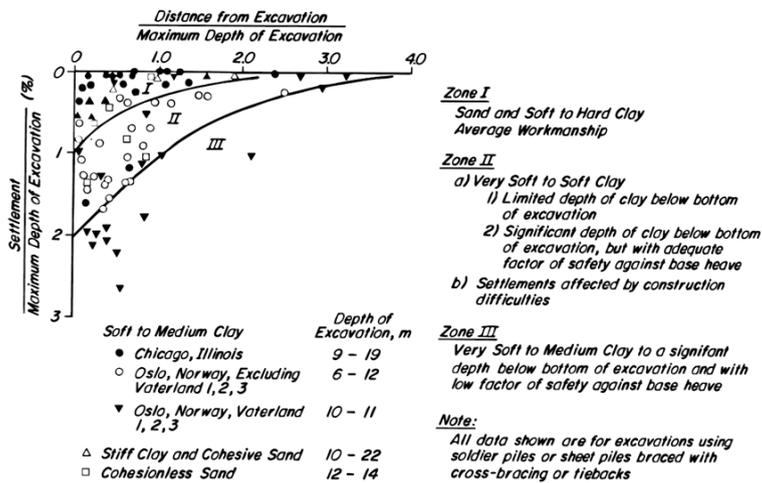


Fig. 3. Ground settlement model (Peck, 1969)

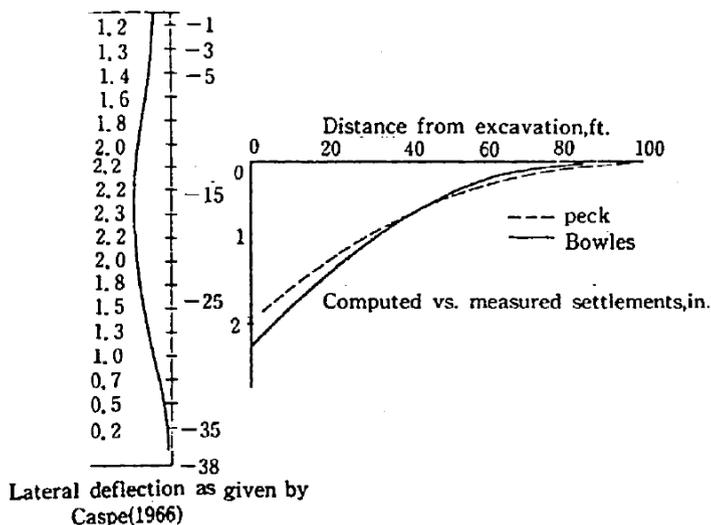


Fig. 4. Ground settlement according to distance from wall (Caspe, 1966)

지반의 지표면 침하량을 예측하는 방법으로는 현장 계측치를 이용하는 경험적 방법과 흙막이 벽체와 지반을 일체로 하여 유한 요소법으로 해석하는 수치해석적 방법 등이 있다. 그러나 굴착으로 인하여 발생하는 지표면 침하는 지반특성, 강성, 규모, 시공방법 등 다양한 변수가 있어 단순화하는 경향이 있다. Peck (1969)은 굴착지반의 특성 및 굴착 깊이에 따라 실제 현장의 변위 계측 자료를 종합하여 지반 침하량을 제안하였다. 이 침하량은 흙막이 벽의 강성이나 지하수위의 영향은 고려하지 않았고, 흙막이 벽의 횡 방향 변형에 따라 규칙적인 침하의 변화를 Fig. 3과 같이 단순화하였다. Caspe (1966)는 Fig. 4와 같이 점성토

지반에 대해 흙막이 벽체의 수평변위와 지반의 포아송비( $\nu$ )를 이용하여 굴착에 따른 인접한 지표면의 침하량 분포를 추정하였다.

2단계 연구로서, 지표면 침하에 따른 구조물의 변형 양상을 수치해석적 연구로 수행하였다. 즉 1단계 연구에서 실내 모형실험을 통하여 산출된 지표면 침하량을 수치해석상의 지반 침하량으로 적용하여 인접 구조물 변형 정도를 수직 침하량으로 도출하였다. 이때 구조물과 지반은 Son (2003)의 연구를 참조하여 2층 조적식 구조물과 반무한 탄성지반으로 모델링하였고 개별요소 프로그램인 UDEC 4.0을 사용하였다.

3단계 연구로서, 2단계 연구에서 얻어진 구조물

Table 1. Description of risk (Rankin, 1988)

Risk category	Maximum slope of building	Maximum settlement of building(mm)	Description of risk
1	Less than 1/500	Less than 10	Negligible: superficial damage unlikely
2	1/500 to 1/200	10 to 50	Slight: possible superficial damage which is unlikely to have structural significance
3	1/200 to 1/50	50 to 75	Moderate: expected superficial damage and possible structural damage to buildings, possible damage to relatively rigid pipelines
4	Greater than 1/50	Greater than 75	High: expected structural damage to buildings. Expected damage to rigid pipelines, possible damage to other pipelines

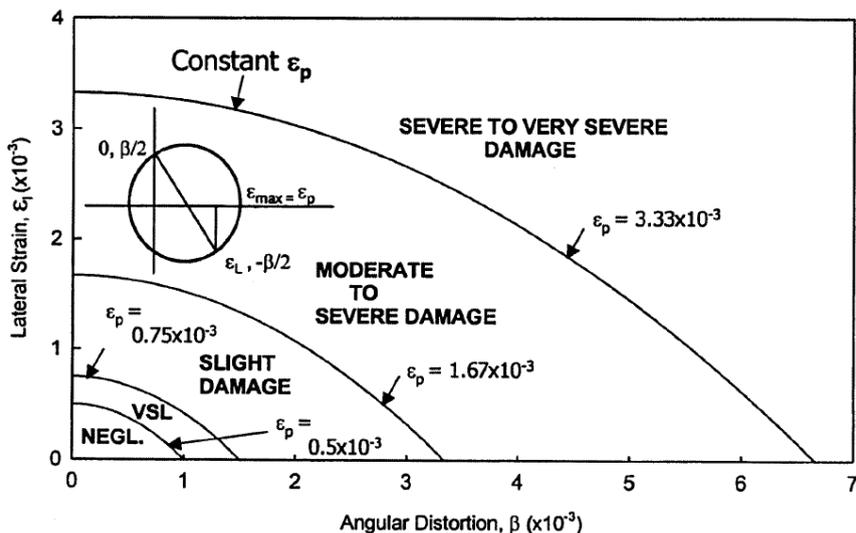


Fig. 5. Strain damage estimation criterion (Son, 2003)

변형 형상 중에서 각 변위와 수평 변형율을 추출하여 구조물의 손상 정도를 평가하였다. 손상도 평가 기준은 Table 1과 같이 Rankin (1988)에 의해 시작되었다. Son (2003)은 선행연구와 현장 계측결과에 근거하여 각 변위와 수평 변형율에 의한 손상도 기준을 Fig. 5와 같이 제시하였다. Fig. 5에서 VSL (Very Slight Damage) 영역의 한계 인장변형율은 Polshin and Tokar (1957)와 Burland and Wroth (1974)가 제시한 처음으로 볼 수 있는 크랙이 발생할 때의 인장변형율 값이고, Slight Damage 영역은 Skempton and MacDonald (1956)와 Bjerrum (1963)이 제시한 자중에 의해 침하된 구조물에 있어서 하중지지벽체와 패널 벽체에 첫 크랙이 발생할 때의 인장변형율 값이며, Moderate to Severe Damage 영역은 Skempton and MacDonald (1956)와 Bjerrum (1963)이 제시한 자중에 의해 침하된 구조물에 있어서 심한 크랙과 구조부재의 손상이 발생할 때의 인장변형율 값이다. 본 연구에서는 Son (2003)의 손상도 기준 그래프를 사용하여 지반의 예상 최대 침하량과 최대 기울기를 이용하여 각 변위와 수평 변형율을 산정하고, 손상도 그래프에 도시하여 이격 거리와 변위 적용율에 따른 손상도를 평가하였다.

## 2. 모형실험을 이용한 지표 침하량 산정

사질토 지반의 흙막이벽 굴착 시 지보 형식에 따른 지표 침하량을 실내 모형실험을 통하여 산정하였다. 제작된 토조 벽체에 인위적인 변위를 가함으로써 굴착에서 발생하는 벽체 변위를 모사하였으며, 이로 인한 모형 지반의 변형을 관찰하였다. Yun (2008)이 제시한 4가지 공법별 변위 모델(앵커모델, 스트러트 모델, 캔틸레버모델, 상부고정앵커모델)을 벽체 변위로 선정하였고, 추가로 시공단계별 지표 침하량을 파악하기 위해 Tang and Kung (2010)이 제시한 시공단계별 모델을 선정하였다.

### 2.1 모형실험 토조

모형실험 토조는 Fig. 6과 같이  $600 \times 400 \times 200$  mm (길이  $\times$  높이  $\times$  폭)의 크기로 제작되었다. 높이에 따른 길이의 비를 굴착 영향거리를 감안하여 2:3으로 설정하였다. 좌우 및 하부 판은 50 mm의 스테인리스강을 이용하여 토조 자체의 변형을 방지하였고, 전면과 후면은 20 mm의 아크릴을 이용하여 실험 지반의 전 과정을 외부에서 관찰할 수 있도록 배치하였다. 지반과 접촉하는 토조의 모든 면은 충분히 큰 강성의 스테인리스강을 사용하고 마찰이 최소화 되도록 매끄럽게 가공하였다. 좌측의 가동 판(흙막이벽을 모사하는 토조 벽체)은 흙막이 굴착 시 발생하는 변위를 시공 단계별로 모사하기 위하여 10단계(10개의 개별 블록)로 나누었으며, 변위를 측정하기 위해 가동 판에 각각 다이얼게이지를 설치하였다. 가동 판의 순차적인 거동을 다이얼게이지로 파악할 수 있으며, 벽체 변위로 인해 모형 지반에는 지표 침하가 발생하게 된다. 지반의 침하량 산정은 Fig. 6에 보인 바와 같이 플라스틱 봉을 이용한 사진측량으로 이루어졌다. 모형지반에 플라스틱 봉을 설치하여 지표와 맞닿게 하고, 플라스틱 봉 상부에 사진측량을 위한 측점을 부착하였다. 측점은 모형 벽체와 가까운 위치로부터 총 42개를 설치하였고, 10단계로 구성된 벽체의 변형에

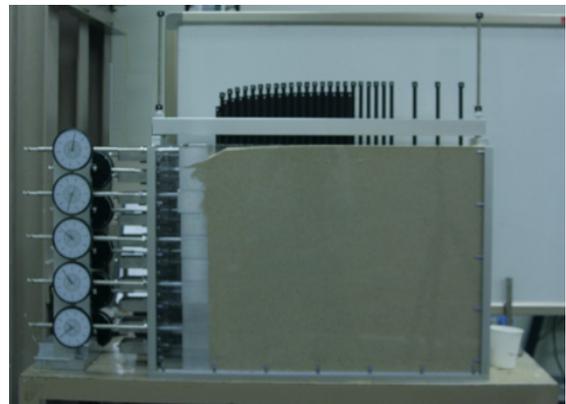


Fig. 6. Model test apparatus

따라 유도되는 지반 변위(플라스틱 봉의 변위)를 사진 촬영하였다. 플라스틱 봉의 기울어짐이나 수평 거동을 제한하면서 수직 거동을 원활히 하기 위해 마찰을 최소화한 스테인리스 유지 판을 설치하였다. 플라스틱 봉은 모형지반에 미치는 영향을 최소화하기 위해 경량 소재를 이용하였고 원통형 모양으로 제작하였다.

## 2.2 실험 재료 및 해석 프로그램

모형실험의 재료로는 여러 연구에서 사질토 지반을 모사하는데 사용하고 있는 주문진 규사를 사용하였다. 초기 조건 구성을 위해 좌측 가동 판의 수평을 맞추고 소형 다짐봉과 소형 롤러를 사용하여 균질한 지반을 조성하였다. 지반의 상대밀도를 측정하기 위해 지반 조성 중에 단위중량 측정용 캔을 설치하고 실험 완료 후 캔을 꺼내어 무게를 측정한 뒤 상대밀도를 산정하였다. 본 실험에서 조성한 지반의 기본 물성치는 Table 2와 같다. 사진 촬영으로 지표 침하량을 산정하기 위해 상용 사진계측 프로그램인 Photo Modeler Pro 5를 사용하였다. PhotoModeler Pro 5는 단일 사진으로도 측정이 가능하나, 오차를 줄이기 위해 일반적으로 세 장 이상의 사진을 필요로 하고, 고해상도 카메라를 이용하는 경우 1/5,000의 정확도를 보인다. 각 실험단계에서 촬영한 사진을 좌표로

Table 2. Physical properties of model tests

Physical properties	Value
Dry unit weight	$\gamma_d = 14 \pm 0.2 \text{ kN/m}^3$
Relative density	$D_r = 40 \pm 5\%$
Specific gravity	$G_s = 2.65$
USCS	SP

변환하였고, 단계별 측정의 변화를 파악하여 지표 침하량을 산정하였다.

## 2.3 실험 과정

모형 토조의 기본 설치 과정은 모든 실험에 동일하게 적용하였다. 토조 벽체 사이에 윤활유를 도포한 후, 벽체들을 나란히 정렬하였다. 준비된 주문진 규사를 토조 내에 일정하게 도포 후 다짐하였다. 이후 유지 판과 플라스틱 봉을 설치하였고, 나란히 배치된 벽체 좌측에 다이얼게이지를 10개의 벽체에 각각 배치 후, 다이얼게이지의 영점을 맞추었다. 시공단계를 모사하기 위해 총 벽체 변형량이 동일하도록 임의로 10개의 벽체를 이동하였다. 4가지의 굴착공법에 따른 지보형식을 모사한 벽체의 변위(앵커모델, 스트러트 모델, 캔틸레버모델, 상부고정앵커모델)는 Table 3(스트러트모델 예시)과 같이 변환하였고, 굴착과 지지에 따른 시공 단계별 벽체의 변위(시공단계별모델)는

Table 3. Wall deflection according to excavation methods (mm) (strut model case)

	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6	Stage 7	Stage 8	Stage 9	Stage 10
1 <sup>st</sup> wall	1	0.5	1	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
2 <sup>nd</sup> wall		1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2
3 <sup>rd</sup> wall			1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.2
4 <sup>th</sup> wall				1.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.4	0.3
5 <sup>th</sup> wall					2	0.7	0.7	0.7	0.6	0.3
6 <sup>th</sup> wall						2	0.5	0.5	0.5	0.5
7 <sup>th</sup> wall							2	0.4	0.4	0.2
8 <sup>th</sup> wall								1	0.5	0.5
9 <sup>th</sup> wall									1	0
10 <sup>th</sup> wall										1

**Table 4.** Wall deflection for construction sequence model (mm)

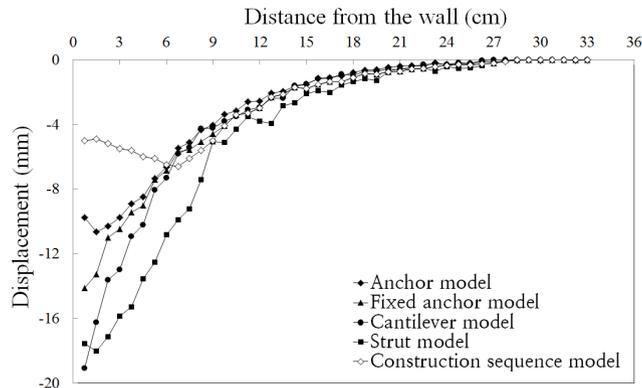
	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6	Stage 7	Stage 8	Stage 9	Stage 10
1 <sup>st</sup> wall	1	1	1	0.6	0.4	0.2	-0.5	-0.3	-0.5	0
2 <sup>nd</sup> wall		1	1	1	0.6	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
3 <sup>rd</sup> wall			1	1	1	0.6	0.6	0.2	0	-0.2
4 <sup>th</sup> wall				1	1	1	1.2	1	0.7	0.2
5 <sup>th</sup> wall					1	1.4	1.4	0.9	0.8	1
6 <sup>th</sup> wall						2	2	0.9	0.5	0.5
7 <sup>th</sup> wall							1	1	1	0.5
8 <sup>th</sup> wall								0.8	0.7	0.6
9 <sup>th</sup> wall									0.6	0.5
10 <sup>th</sup> wall										0.5

Table 4와 같이 변환하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 굴착공법별 4가지의 모델은 벽체가 지속적으로 모형 지반이 이완되는 왼쪽 방향으로 움직이게 되나, Table 4에 나타낸 바와 같이 굴착과 지지를 모사한 시공단계별모델은 벽체의 좌방향 변위에 의해 모형 지반이 이완된 후, 상부 벽체 일부가 우측으로 이동하여 지표가 재 구속 되는 형상을 갖게 된다. 공통적으로 벽체의 변위를 적용한 뒤에 지반이 안정화되도록 충분한 시간이 흐른 뒤 단계별로 사진측량을 실시하였다.

### 2.4 실험 결과 및 분석

총 5가지 모델에 대하여 벽체(흙막이벽)로부터 이

격거리에 따른 최종 지표 침하량(stage 10에서의 침하량)을 Fig. 7에 나타내었다. 강제변위법을 모사한 4가지 모델은 모두 Caspe (1966)가 제시한 지표 침하형상을 유사하게 나타냈으며, 굴착공법별 최대 침하량을 비교해 볼 때, 캔틸레버모델 > 스트러트모델 > 상부 고정앵커모델 > 앵커모델의 순으로 나타났다. 상부의 변위가 작을수록 벽체와 가까운 모형 지반의 침하도 감소함을 확인하였다. 한편 굴착 후 지지를 모사하는 시공단계별모델에 대하여 벽체(흙막이벽)로부터 이격거리에 따른 시공 단계별 지표침하 형태를 Fig. 8에 나타내었다. 초기 5단계까지의 침하는 이전 모델과 동일한 그래프 형태를 보이나, 이후 벽체의 재 구속으로 인하여 상부의 침하가 어느 정도 회복되는



**Fig. 7.** Final ground surface displacement

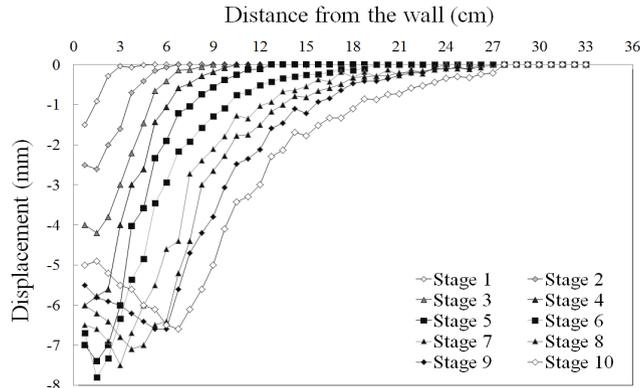


Fig. 8. Ground surface displacement for construction sequence model

형태를 보이고 있다. 이 모델의 최대 침하량은 벽체에 서 다소 떨어진 벽체로부터 약 6 mm 지점에서 발생하였다.

### 3. 수치해석기법을 이용한 구조물 변형 양상 산정

#### 3.1 수치해석 모델링

지반굴착에 따른 흙막이 벽에 인접한 구조물의 변형 양상을 산정하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 즉 지반 굴착(벽체 변위)을 모사한 실내 모형실험으로부터 얻어진 지표 침하량을 그대로 수치해석상의 지반 침하량으로 입력함으로써 인접 구조물의 변형 양상을 연구하였다. 수치해석은 개별요소법을 적용한 범용 프로그램인 UDEC 4.0을 사용하였다. 본 연구에

서 일반적으로 사용하는 유한요소법(FEM)이 아닌 개별요소법(DEM)을 사용한 이유는 상부구조물을 블록 구조물로 모델링하였고 따라서 개별 블록을 효과적으로 모델링하기 위하여 개별요소법을 사용하였다. 상부구조물은 Son (2003)의 연구를 참조하여 Fig. 9에서 보인 바와 같이 각 개별 블록 사이를 몰탈 성질의 조인트 요소로 연결한 조적식 구조물로 모델링하였고, 지반은 반무한 탄성지반으로 가정하였다. 수치해석에 적용한 조적식 구조물과 반무한 탄성지반의 물성을 Table 5에 제시하였다. 조적식 구조물은 2층 높이로 제작하였으며, 구조물 하부에 두께 50 mm의 지반을 형성하였다. 따라서 수치해석 시에는 이 하부 지반에 실내 모형실험에서 각 모델별로 도출한 지표 침하량에 해당하는 만큼의 변위를 부여하였다. 본 연구에서는 보다 가시적인 지표의 침하량과 구조물의 변형을 파악하고자 모형실험에서 산출된 지표 침하량

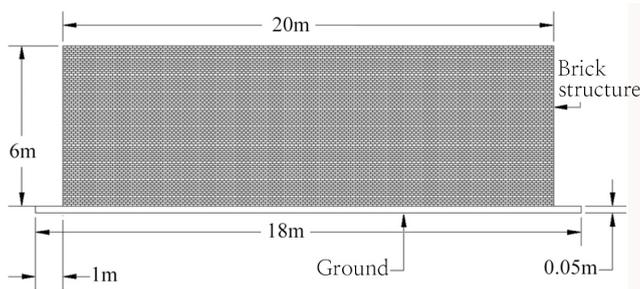


Fig. 9. Numerical modelling

**Table 5.** Physical properties of numerical analysis

Brick structure	Elastic modulus (MPa)	10.3e3
	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	19.17
	Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.2
	Brick size (mm)	400×200
Ground	Elastic modulus (MPa)	17.2
	Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.34

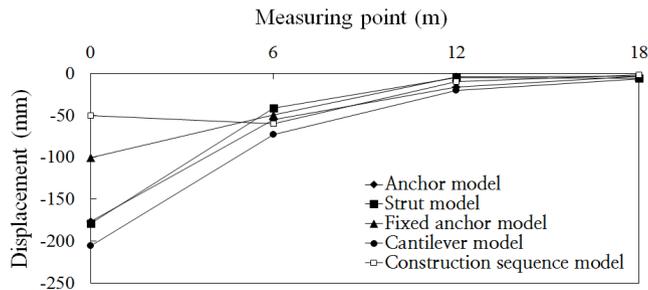
을 50배 확대하여 모델링한 지반 하부에 적용하였다.

모형실험에서 얻은 지표 침하량 자료를 바탕으로 실제 구조물 하부의 지반으로써 반영하여 수직변위를 부여하였다. 구조물의 수평변위는 굴착에 의한 최대 침하량과 최대 수평변위의 관계에 대한 연구에서 최대 수평 변위량은 최대 침하량 대비 약 35%임을 반영하여(Son and Yun, 2010) 수직변위의 약 1/3의 값으로 반영하였다. 구조물의 변형 경향을 다각적으로 파악하기 위하여 구조물이 벽체에서부터 0.0 m 및 0.5 m의 이격 거리에 각각 위치하고 있을 때 구조물 변형량을 각각 산정하였고, 또한 지표 침하량을 100%,

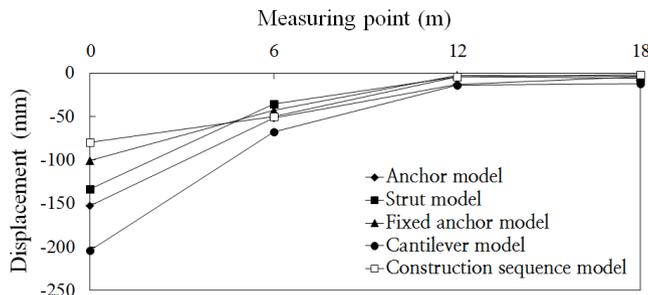
50%, 30%, 10%로 변환하여 수치해석을 각각 적용했을 때의 구조물 변형량을 도출하였다.

### 3.2 수치해석 결과 및 분석

벽체와 구조물의 이격 거리가 0.0 m인 조건에서 각 지반 굴착 모델별로 구조물 측정 위치에 따른 구조물의 침하량(수직 변위량)을 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 횡축의 구조물 측정 위치란 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 구조물의 길이가 18 m이므로 왼쪽 끝점을 측정 위치 0.0 m로 선정하고 오른쪽으로 움직인 길이만큼을 숫자로 표시한 것이다. 즉 12 m 구조물 측정 위치는 구조물의 왼쪽 끝에서부터 12 m 떨어진 지점에서 측정된 구조물의 수직 변위량을 의미한다. 강제 변위법을 모사한 4가지 모델의 구조물 침하량은 실내 실험에서의 지표 침하량과 유사한 형태를 나타냈다. 구조물의 최대 침하량은 실내 실험의 침하량과 다소 차이를 보였다. 캔틸레버 > 앵커 > 스트러트 >



**Fig. 10.** Structure displacement at distance of 0.0 m



**Fig. 11.** Structure displacement at distance of 0.5 m

상부고정앵커 순으로 최대 침하량이 나타났다. 이 결과는 실내 모형실험 결과를 참고해 볼 때, 최대 침하량의 순서가 변경된 결과를 보였다. 4가지 모델 중 스트러트 모델이 전반적인 침하량은 크게 나타났지만, 앵커 모델의 침하 기울기와 비교해 보았을 때 작은 기울기를 나타냈다. 결과적으로 구조물 침하량에서 스트러트 모델이 앵커 모델보다 적은 구조물 침하를 나타냈다. 기울기가 큰 침하 형태가 구조물 변형에 직접적인 요소로 작용함을 알 수 있었다. 굴착 후 지지를

모사한 시공단계별 모델의 그래프는 최대 침하량이 측정 위치 60 m 지점에서 나타났으며, 이 결과는 실내 모형실험에서 지표면 침하가 회복되는 현상으로 인해 구조물 침하도 감소되는 효과를 나타내고 있다. 굴착 후 지반과 구조물의 강성을 일정한 값으로 고려하였을 때, 지반의 침하량은 구조물의 침하량과 직결됨을 모든 수치해석 결과에서 확인하였다. 벽체와 구조물의 이격 거리가 0.5 m인 조건에서 각 지반 굴착 모델별로 수행한 수치해석 결과도 Fig. 11에서 보는 바와

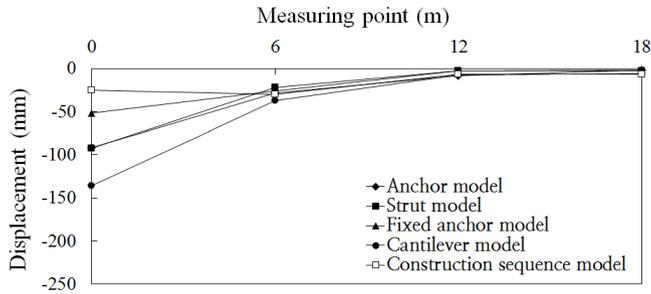


Fig. 12. Structure displacement at displacement ratio of 50%

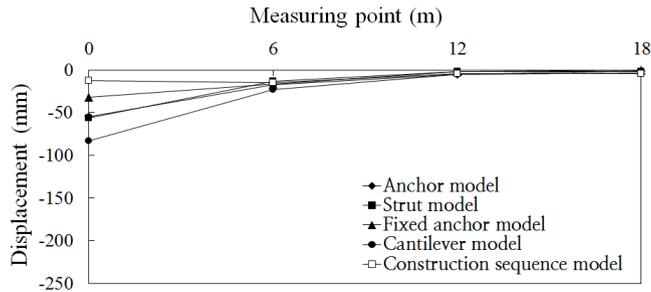


Fig. 13. Structure displacement at displacement ratio of 30%

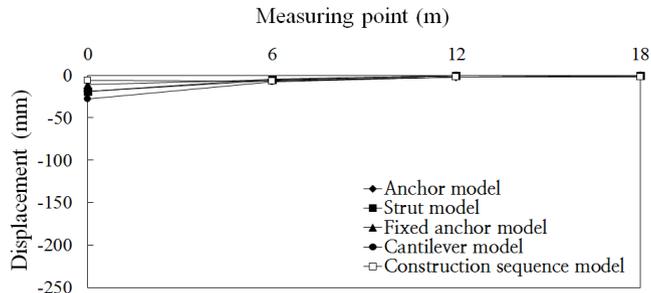


Fig. 14. Structure displacement at displacement ratio of 10%

같이 0.0 m인 경우와 침하량의 차이만을 보일 뿐 유사한 양상을 나타내고 있다.

Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14는 벽체와 구조물의 이격 거리를 0.0 m로 고정한 채, 실내 모형실험에서 얻은 지표 침하량을 수치해석상의 지반 침하량으로 대입할 때 각각 50%, 30% 및 10%로 변환하여 수치 해석을 수행한 결과이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 벽체의 변위가 클 때에는 강제 변위법(캔틸레버모델)의 굴착공법과 지보를 고려한 시공단계별 모델이 최대 130 mm의 구조물의 침하 차이를 보이지만 벽체의 변위 차이가 서로 크지 않을 때에는 거의 유사한 최대 침하량을 나타냄을 확인하였다.

#### 4. 구조물 손상도 평가

앞에서 산출한 구조물 변형량을 Fig. 5에 제시한 각 변위와 수평 변형율에 의한 손상도 기준 그래프 (Son, 2003)에 적용함으로써 구조물의 손상 정도를 파악하였다. 즉 구조물의 침하량을 각 변위와 수평 변형율로 변환하여 Fig. 5에 적용하였다. 벽체와 구조물의 이격 거리가 0.0 m인 조건에서 수행한 손상도 평가 그래프를 Fig. 15에 나타내었고, 이격거리가 0.5 m인 경우의 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 각 경우에 있어서 굴착 모델은 전술한 5가지 모델을 전부 적용하였다. 또한 벽체 변위 양상은 모델을 따르나 변위량 감소에 따른 손상 정도의 변화를 파악하고자 실내 모형실험에서 나온 지표면 침하량에 일정 비율을 곱

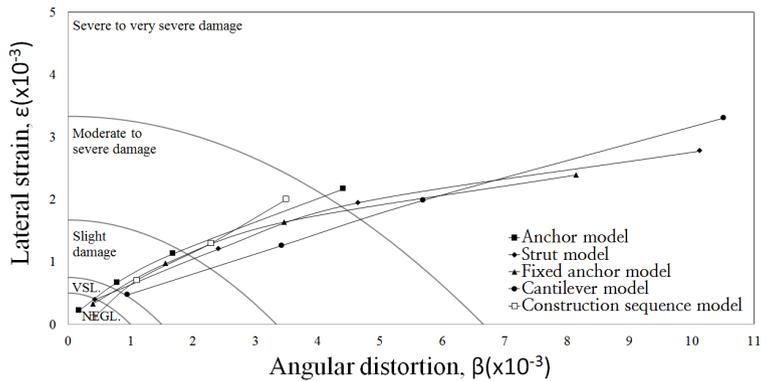


Fig. 15. Damage assessment at distance of 0.0 m

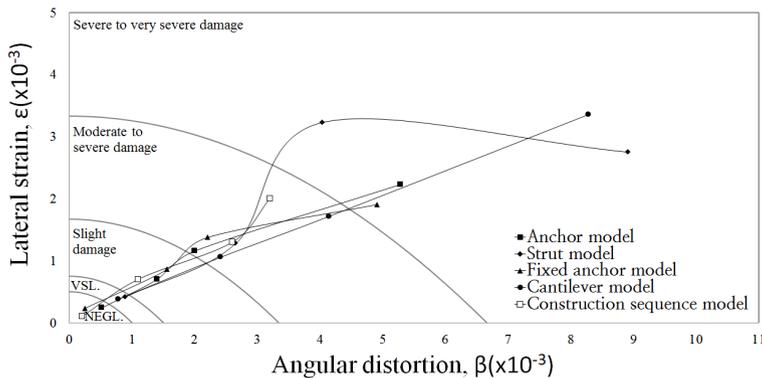


Fig. 16. Damage assessment at distance of 0.5 m

하여 총 4가지 경우(100%, 50%, 30%, 10%)로 나누어 손상도 평가를 수행하였다. 즉 각각의 변위량에 대한 수치해석을 수행하여 구조물 변형량을 산정하고 이를 손상도 그래프에 표시하였다. 예를 들어 Fig. 15에서 상부고정앵커 모델의 경우를 보면 severe to very severe damage 영역에 표시된 점은 상부고정앵커 모델로 실내 모형실험을 수행하여 지표면 침하량을 산정하고 이를 100% 고려하여 수치해석에 대입하여 구조물 변형량을 구하고 손상도를 평가한 사항이고, moderate to severe damage 영역에 표시된 점은 상부고정앵커 모델로 실내 모형실험을 수행하여 지표면 침하량을 산정하고 이를 50%만 고려하여 수치해석에 대입하여 구조물 변형량을 구하고 손상도를 평가한 사항이다.

결과적으로 대부분의 모델에서 벽체 변위량(변위 적용율) 변화에 따른 손상도 변화 양상은 직선 형태로 나타났다. 강제 변위법을 적용한 4가지 공법 모델 모두 거의 유사한 기울기를 나타냈고, 변위 적용율이 감소할수록 안전측으로 이동하는 것을 확인하였다. 굴착 후 지지를 모사한 시공단계별 모델의 경우도 유사한 직선 형태의 변화와 유사한 기울기를 보였으나, 변위 적용율이 100% 일 때에도 심각한 손상 영역에는 위치하고 있지 않은 결과를 나타냈다. 벽체와 구조물의 이격 거리 관점에서 보면, 전체적인 그래프의 형태는 변함이 없었으나 각 변위가 평균적으로 0.002로 감소하였고, 수평 변형량은 0.001 정도의 작은 감소폭을 보였다. Fig. 16에서 스트러트 모델의 변위 적용율 50%에서의 수평 변형율이 급격히 증가한 형태를 보이는데, 이는 수치해석 과정에서 조적식 구조물로 모사한 블록의 이탈로 인해 급격한 침하가 수평 변형을 유발하였기 때문인 것으로 확인되었다. 모든 손상도 평가 과정에서 볼 때, 평균적으로 58.3% 정도의 변위를 적용했을 때, 심각한 손상 영역(severe to very severe damage)에서 벗어남을 보였고, 약 15%의 변위를 적용했을 때, 약간의 손상 영역(very slight damage)으로 접근함을 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실내 모형실험을 통하여 5가지 형태의 지반 굴착방법에 따른 인접 지반의 지표면 변위를 산정하고, 이를 수치해석에 적용하여 지표면 침하에 따른 구조물의 변형 양상을 연구하였다. 이렇게 얻어진 구조물 변형 형상 중에서 각 변위와 수평 변형율을 추출하여 최종적으로 인접 구조물의 손상 정도를 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실내 모형실험을 통하여 다양한 형태의 지반 굴착방법에 따른 지표 침하량을 분석한 결과, 각 굴착방법에 따라 지표면 변위 양상이 다르게 나타났으며, 상부에 해당하는 벽체의 변형이 많을 경우에 침하량이 민감하게 증가함을 보였다. 상부의 변위가 비교적 적을 경우에, 이어지는 구조물의 변형 및 손상도 평가 항목인 각 변위와 수평 변형율 감소에도 효과를 보였다.
2. 실내 모형실험 결과, 강제 변위법을 적용한 4가지 굴착모델에서는 최대 침하량이 벽체와 근접한 부근에서 나타났으나, 굴착 후 앵커 지지를 모사한 시공단계별 모델에서는 벽체와 다소 떨어진 부근에서 최대 침하량이 나타났다.
3. 실내 모형실험을 통하여 각 굴착공법 모델별로 구한 최대 지표 침하량은 캔틸레버 > 스트러트 > 상부고정앵커 > 앵커 순으로 나타났으나, 지표 침하량을 적용하여 수치해석을 통하여 구한 구조물의 최대 침하량은 캔틸레버 > 앵커 > 스트러트 > 상부고정앵커 순으로 나타났다. 이는 기울기가 큰 침하 형태가 구조물 변형에 더 영향을 미치는 요소로 작용함을 나타내고 있다.
4. 변위 적용율에 따라 각 변위와 수평 변형량의 감소를 산정하고, 이를 수치해석에 적용하여 변위 적용율에 따른 구조물 손상 정도의 변화과정을 평가하여 본 결과, 거의 모든 모델에서 각 변위와 수평 변형이 감소하고 따라서 변위 적용율에 따라 거의

직선적으로 손상정도가 감소하는 양상을 보였다. 결국 이러한 변화 양상을 실제 현장조건을 적용하여 미리 파악하고 있다면, 구조물의 손상을 허용범위 이내에서 허용하면서 토압을 경감할 수 있는 즉 지표 침하를 허용할 수 있는 한계치를 산정하는데 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호10기술혁신E04).

## 참고문헌

1. Bjerrum, L. (1963), "Discussion on proceedings of the european conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. III", Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No. 98, Oslo, Norway, pp. 1-3.
2. Burland, J.B., Wroth, C.P. (1974), "Settlement of buildings and associated damage", Proceedings of a Confernece on Settlement of Structures, Cambrige, pp. 611-654.
3. Caspe, M.S. (1966), "Surface settlement adjacent to braced open cuts", JSMFD, ASCE, Vol. 92, SM 4, pp. 51-59.
4. Cording, E.J. (1984), "Use of empirical data for braced excavations and tunnels in soil", Lecture Series, Chicago ASCE, Chicago, IL.
5. Milligan, G.W.E. (1974), "The behaviour of rigid and flexible retaining walls in sand", Ph.D dissertation, University of Cambridge.
6. Peck, R.B. (1969), "Deep excavation and tunneling in soft ground", Proc. of 7th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Mexico, Vol. 4.
7. Polshin, D.E., Tokar, R.A. (1957), "Maximum allowable non-uniform settlement of structures", Proc. The 4th int'l Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr., Butterworth, England, Vol 1, pp. 402-405.
8. Rankin, W.J. (1988), "Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects", Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, Vol. 5, No. 1, pp. 79-92.
9. Skempton, A.W., MacDonald, D.H. (1956), "The allowable settlement of Buildings", Proc. Inst. of Civ. Engrs., III, 5, pp. 727-784.
10. Son, M. (2003), "The response of buildings to excavation-induced ground movement", Ph.D dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
11. Son M.-R., Yun, J.-C. (2010), "Comparison of ground movements in a single ground layer and multiple ground layers due to nearby tunnel excavation", J. of KSCE, Vol. 30, No. 3C, pp. 167-174.
12. Tang, Y.G., Kung, G.T.C. (2010), "Investigating the effect of soil models on deformations caused by braced excavations through an inverse-analysis technique", Computers and Geotechnics, Vol. 37, pp. 769-780.
13. Yun, J.-M. (2008), "Deformation analysis of excavated behind ground by the artificial displacement method(II) - numerical analysis and application", J. of Korean Geosynthetics society, Vol. 7, No. 3, pp. 31-40.