

# 흙막이굴착에 따른 인접건물의 손상평가에 대한 모형실험연구

## Model Tests for the Damage Assessment of Adjacent Buildings in Urban Excavation

김 학 문<sup>1</sup> Kim, Hak-Moon

황 의 석<sup>2</sup> Hwang, Eui-Suk

### Abstract

This study is to investigate the damage assessment of adjacent structures due to excavation in urban environment. Model tests were carried out for 2 story masonry building and frame structures in various shapes and locations. The damage level of adjacent structures were very differently estimated in accordance with the shape ratio (L/h) of structures, construction stages, and various locations. Therefore the most weak part (bay) of structure must be heavily instrumented and monitored in more details at early stage of constructions. The progressive crack development mechanism at various construction stages was revealed through model tests and crack size indicated more conservative side of damage level on the damage level graph.

### 요 지

본 연구는 흙막이굴착 공사에 의한 지반거동을 평가하여, 구조물의 형상, 위치, 굴착공정 변화등의 다양한 조건과 지반/구조물의 상호작용이 고려된 모형실험을 기본으로 수행하였다. 흙막이굴착에 따른 인접구조물의 손상수준은 구조물의 형상비(L/h), 굴착단계, 이격거리(X) 등에 따라 현저히 다르게 나타남을 확인하였으며, 구조물중 가장 취약한 구간(BAY)에 따른 평가가 시공초기에 보다 세밀하고 구체적으로 분석되어야 할 것으로 판단된다. 구조물에 발생된 균열의 손상수준을 손상도표에서 평가해 본 결과, 균열손상 수준이 적용된 평가가 각변위와 수평변형을만 적용된 손상수준보다 안전측으로 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 각변위와 수평변형을 뿐만 아니라 균열이 고려된 손상평가를 수행하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

**Keywords** : Adjacent building, Damage assessment, Damage level, Urban excavation

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

일반적으로 흙막이 굴착공사에 의해 시공될 본 구조물에 대한 안전한 설계 및 시공기술은 지속적인 연구 및 경험에 의해 점차 확립되고 있는 단계에 있다. 그러나,

이들 공사로 인한 굴착 현장에 인접한 도심지 구조물의 세부적인 안정성 평가 연구는 최근에서야 그 관심이 고조되고 있다. 물론 굴착공사시 시공하고자 하는 본 구조물의 안정성 여부가 인접한 구조물의 안정성에 직결되는 것은 사실이나 본 구조물이 안전하게 시공중이라도 인접한 구조물은 보다 민감하게 반응하여 이들 구조물의 안정성에 심각한 영향을 초래할 수 있음을 간과해서

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Dankook Univ., khm1028@dankook.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 대리 (Member, Assistant manager, Civil Research & Engrg. Team, Daelim Industrial Co. Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 안 될 것이다.

이와 같이 도심지에서의 굴착공사는 본 구조물 자체를 안전하게 시공함은 물론이고 인접구조물에 대한 영향이 최소화 되어야 한다는 전제조건이 중요한 사항이다.

현재, 흙막이 굴착 공사시 인접구조물의 거동 및 손상 평가는 구조물의 하중을 연성하중으로 적용하거나 구조물을 연속체 요소로 모델링한 수치해석적인 검토를 통하여 설계 및 시공시에 이를 반영하고 있다. 이는 인접 구조물과 지반 거동이 동일하게 일어나는 것으로 예측 평가되어 지반/구조물의 상호작용이 고려되지 않아 보다 정확한 구조물의 거동 손상 평가시 다소 불합리하게 된다.

그러므로 흙막이 굴착 공사시 인접구조물의 안정성 평가는 점차 그 중요성이 대두되고 있으며, 최근에는 지반굴착시 지반거동과 인접구조물의 상호 거동에 대한 수치해석, 모형실험, 현장계측결과에 의한 연구가 이루어지고 있으며, 구조물의 형상, 위치, 굴착공정 변화등의 다양한 조건 및 지반/구조물의 상호작용에 따른 구조물의 거동 및 손상정도를 사전에 예측하여 필요시 대책을 마련하는 체계적인 연구가 필요할 것이다.

## 1.2 연구 동향

흙막이 굴착 관련연구는 비교적 오랜 기간동안 많은 학자들에 의해 체계적으로 연구가 이루어졌으나 주로 흙막이 구조물 자체의 설계 및 시공시 안정성 평가에 주된 연구가 수행되어 왔다. 또한 흙막이 굴착시의 지반 거동을 수치해석적인 방법과 경험적인 방법으로 산정하여 인접구조물의 거동으로 평가하는 보수적인 방법등을 제안하고 있어, 지반거동과 인접구조물의 상호거동 평가가 배제되어 단계굴착에 따른 구조물의 거동 및 손상등의 세부평가에 대한 연구는 미진한 상태이다.

양구승 등(1997)은 국내 수도권 도심지역의 깊은굴착공사로 인하여 발생하는 인접지표의 침하에 대해 현장측정을 중심으로 연구를 수행하여 인접지표 및 구조물에 균열등의 피해가 발생한 7개 현장사례를 통하여 굴착공사로 인한 인접 지표의 균열발생범위에 대하여 분석하였다.

신은철 등(2000)은 도심지 흙막이 굴착시 주변침하가 발생된 굴착현장에 대한 현장조사와 설계 및 계측자료를 분석 검토하여 현재까지 제안된 주변 지반침하 추정 방법의 적용성을 검증하였으며, 현장조사를 통하여 인

접지반 및 구조물의 거동을 분석하였다.

유충식 (2001)은 지반굴착에 따른 지반거동 메카니즘을 고찰하였으며, 건물손상 평가 기법으로써 가장 일반화된 기법을 제시하고 건물손상 평가에서 수평변위 고려의 필요성을 언급하여 건물이나 매설관에 대해서는 지반/구조물 상호작용 개념이 적용된 상세검토를 수행하고 그 결과를 토대로 구체적인 손상여부 및 정도에 대한 상세평가를 실시하여 설계 및 시공시 이를 반영하여야 함을 제안하였다. 또한 깊은 굴착에 따른 지표변위 특성을 벽체강성과 무지보 굴착깊이 등의 조건을 변화시켜 유한요소 해석을 통해 고찰하여 깊은 굴착에 따른 지표변위 특성은 캔틸레버 굴착깊이와 무지보 굴착깊이에 따라 좌우됨을 규명하였다.

국외의 경우 지반굴착에 따른 구조물의 거동 및 손상 평가등의 연구는 구조물 자중에 의한 거동과 굴착에 따른 지반거동 연구를 시작으로 1950년대부터 활발히 연구되었다.

최근의 국외 연구는 지반/구조물의 상호작용에 대한 중요성을 인식하여, 지반변위와 인접구조물의 거동에 대한 지속적인 계측, 관찰 및 연구가 필요함을 제시하고 있으며, 구조물 손상평가 인자들에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

Peck(1969)은 현장 측정결과로부터 굴착에 따른 인접 지표의 침하 크기와 분포를 흙막이벽으로 부터의 수평 거리에 따라 표시하고 크게 3영역으로 분류하여 나타내었으며, 굴착 공사시 다양한 조건 아래에서 예상할 수 있는 침하에 대한 산정 방법을 제시하고 있다.

Bjerrum(1963)은 부등침하로 인한 각변위의 변화와 건물의 피해정도를 예측할 수 있는 허용기준치를 제안하였다.

Burland and Wroth(1974)는 임계 인장변형율의 개념을 발전시켜 단순보(simple beam model)의 초기 가시 균열에 적용시켰으며, 분석결과 석조 건물벽의 임계 인장 변형율의 값이 0.0005~0.00075 정도임을 밝힌 바 있다. 또한 Wahls(1981)등은 각종 실험 및 계측을 통해서 건물의 임계 인장변형율을 제안하였다.

Boscardin 등(1978)은 Washington D.C. 지하철 공사중에 직접 계측을 수행하여 구조물에 심각한 손상을 줄 수 있는 각변위의 한계치로서 1/60~1/200정도를 제안하였고, 이 수치는 실제 육안관찰을 통해서 균열이 발견된 상황에서의 임계치임을 보고하였다.

Boscardin and Cording(1989)은 현장사례 연구를 통

해 손상등급과 건물에 유발된 인장변형율은 많은 연관이 있음을 확인하였으며 손상등급별 인장변형율의 범위를 제시하였다.

Potts and Addenbrooke(1996, 1997)은 유한요소해석을 통해 건물의 강성에 의해 지표침하가 억제되는 경향성을 분석하였다. 그들은 상대 강성비(relative building stiffness)와 보정계수(modification factor)개념을 도입하여 각변위나 처짐비와 같은 손상 평가인자들이 과대 평가되는 경향을 현실성 있게 예측할 수 있도록 하였다.

Boone(1996)은 지반거동에 따른 누적균열폭을 계산하는데 사용할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이 후, Boone 등(1999)은 손상단계의 범위를 수정 제안하였다.

## 2. 흠막이 굴착에 따른 인접구조물의 거동 모형실험

### 2.1 실험 개요

본 연구는 Peck(1969)이 제안한 흠막이 굴착시 발생되는 지반침하량을 인접구조물에 적용시켜 지반거동에 의한 구조물의 거동 및 손상변화에 대하여 평가하였다. 인접구조물은 지반거동에 쉽게 영향을 받을 수 있는 조적식구조물과 프레임구조물을 실험시 1/10의 스케일로 실내에서 모형화 하였다. 모형실험의 종류로는 표 1과 같이 구조물의 이격거리, 형상비 변화에 따른 총 15개 조건들에 대한 모형실험을 수행하였다.

### 2.2 조적식 구조물의 모델링

조적구조물 축조시 중요한 사항은 개개의 벽돌과 벽

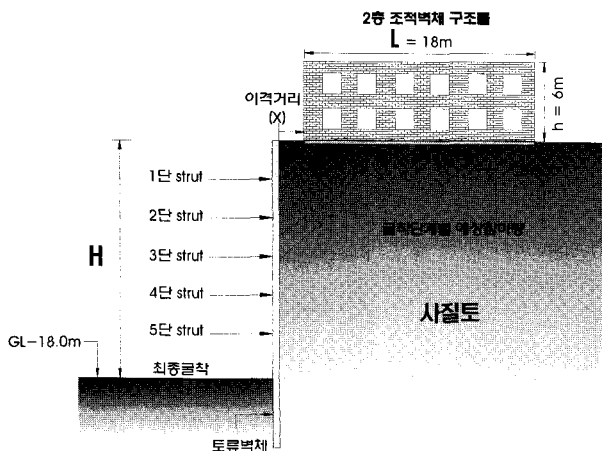


그림 1. 조적식구조물의 모형실험시 적용된 가정단면

들 사이에 줄눈재의 균질성을 확보하여 전체 조적구조물을 안정적으로 형성시켜야 한다. 또한, 모형실험중 형상비(L/h)가 3.0인 조건에 대하여 3회 반복실험을 수행하여 반복성에 따른 결과 차이를 비교해 본 결과, 구조물의 거동과 균열패턴은 유사하게 나타나, 조적구조물의 균질성과 반복실험에 의한 실험 결과의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

표 1. 모형실험 개요

지반조건	형상비 (L/h)	이격거리비 (X/H)	비 고
사질토 지반	1.0	0	E-1 (조적식)
			EF-1 (프레임)
		0.2	E-2 (조적식)
		0.4	E-3 (조적식)
	1.5	0.6	E-4 (조적식)
		0	E-5 (조적식)
		0.2	E-6 (조적식)
	2.0	0.4	E-7 (조적식)
		0	E-8 (조적식)
	2.5	0.2	EF-2 (프레임)
		0.2	E-9 (조적식)
	3.0	0	E-10 (조적식)
			E-11 (조적식)
		0	E-12 (조적식)
			EF-3 (프레임)

여기서, H : 굴착깊이 X : 이격거리 h : 구조물의 높이  
L : 구조물의 길이

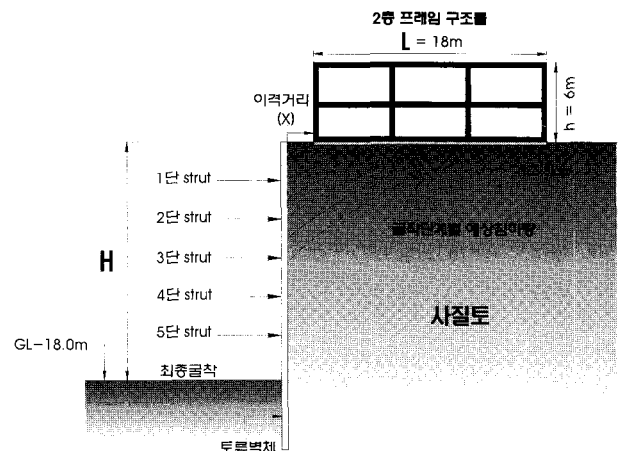


그림 2. 프레임구조물의 모형실험시 적용된 가정단면

(1) 지반조건 및 기초

본 실험에서 적용된 지반은 사질토이며, 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 조적식구조물 벽체하부와 기초지반사이에 구조물의 기초는 강성을 무시할 정도로 최소로 하여 지반과 유사하게 거동하게 하기 위해 모르타르를 얇게 타설하여 연성기초로 제작 하였다.

(2) 모형벽체 벽돌

모형실험 벽체에 사용될 벽돌은 현재 현장에서 사용하는 시멘트형 표준벽돌규격인 190mm×90mm×57mm를 적용하여 본 벽돌의 약 1/4로 축소해서 자체 제작하였다. 모형실험에 사용된 벽돌의 규격은 길이 48mm×폭 23mm×높이 15mm이며, 벽돌제작은 배합비를 달리하여 현장에서 사용되는 표준형 벽돌의 강도와 단위중량을 고려하여 선정하였다. 표 2의 벽돌 물성치는 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법(KS L 5105)으로 평가하였다.

(3) 줄눈재

벽돌과 벽돌사이에 사용될 줄눈을 일반 시멘트와 물의 배합으로 사용할 경우, 모형실험시에는 벽돌과의 접

착 인장력이 크게 발휘되므로 강도를 줄일 수 있는 재료를 선정할 필요가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 석고와 모래의 혼합비 변화에 따라 인장강도 시험을 수행하여 모형실험에 사용될 줄눈재를 선정하였다. 줄눈재료의 특성치를 보면 표 3과 같다.

2.3 실험 장비

본 실험에서 사용된 실험장비는 모형벽체 침하장비, 변위측정 및 균열측정 장비로 분류될 수 있다.

(1) 지반침하 발생 모형실험 장비

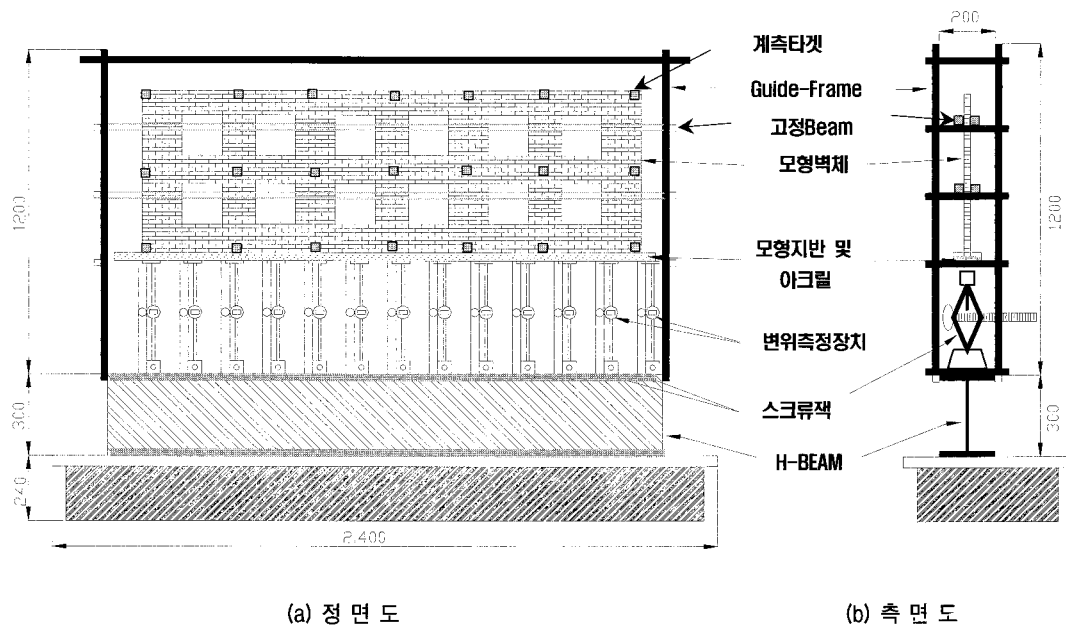
지반의 침하 거동을 모형벽체 하부에 유발시킬 수 있도록 그림 3과 같이 H-beam위에 스크류 잭을 고정시킨 장치이다. 스크류 잭은 총 13개를 사용하여 지반의 침하를 유발시킬 수 있으며, 스크류잭 사이에 변위측정기를 설치하여 정확한 침하량 적용이 가능하게 하였다. 또한 침하장치 외곽에는 guide beam을 사용하여 벽체 형성시 전도되는 것을 방지하였다. 모형실험 장비 전경은 그림 4 및 5와 같다.

표 2. 벽돌의 물성치

항 목	단위중량(t/m <sup>3</sup> )	일축압축강도(t/m <sup>2</sup> )	탄성계수(t/m <sup>2</sup> )
실험치	2.04	1,650	20,838.5

표 3. 줄눈재의 물성치

항 목	단위중량(t/m <sup>2</sup> )	일축압축강도(t/m <sup>2</sup> )	점착인장강도(t/m <sup>2</sup> )	탄성계수(t/m <sup>2</sup> )
실험치	1.75	47.2	2.8	4864.9



(a) 정 면 도 (b) 측 면 도

그림 3. 지반침하 발생 모형실험장치 상세도(조적식구조물)

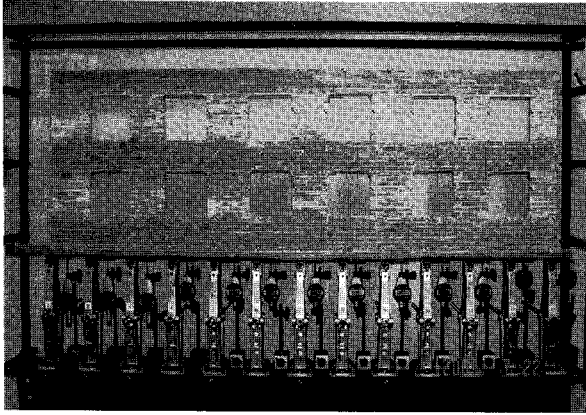


그림 4. 지반침하 발생 모형실험 장치 전경(조적식구조물)

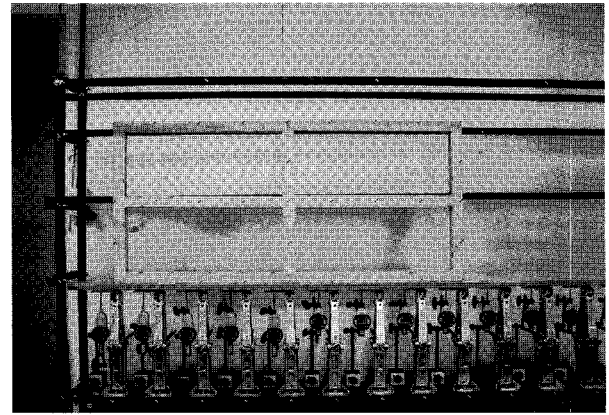


그림 5. 지반침하 발생 모형실험 장치 전경(조적식구조물)

## (2) 변위 및 균열측정장치

스크류잭을 이용하여 정확한 지반의 침하량을 유발시키기 위하여 디지털식 변위 측정기(정밀도 : 0.001mm)를 사용하였으며, 지반침하에 따른 구조물의 거동을 측정하기 위하여 그림 계측을 사용하여 구조물 및 지반의 변화를 측정하였다. 또한 굴착단계에 따른 균열양상을 측정하기 위해 균열경을 사용하여 굴착단계별로 균열의 크기와 변화를 확인하였다.

## 3. 흠막이 굴착에 따른 인접구조물의 손상평가

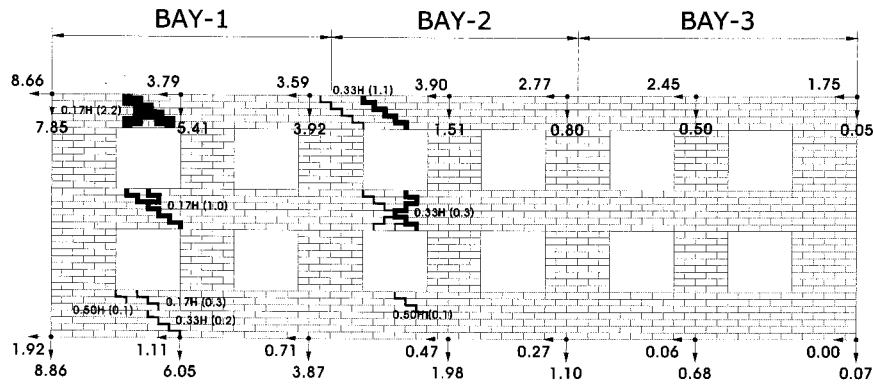
흠막이 굴착시 발생하는 배면 지반의 침하량을 모형실험시 구조물 하부지반에 적용시켜 지반/구조물 상호작용이 고려된 구조물의 정성적이고 정량적인 거동을 고찰 분석하여 지반거동에 따른 구조물의 거동 및 손상정도를 규명하고자 하였다.

실험조건으로는 굴착진행 단계, 구조물의 형상, 구조물의 이격거리등을 변화시켰으며 이에 따른 실험결과를 분석하였다.

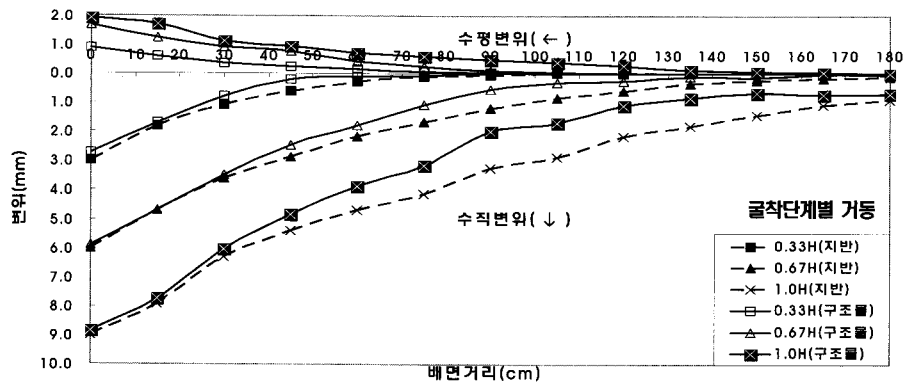
### 3.1 구조물의 형상에 따른 지반/구조물의 거동

흠막이 굴착시 인접한 구조물의 높이(h)에 대한 구조물의 길이(L)비(형상비, L/h)에 따른 구조물의 손상거동 변화를 평가하기 위하여, L/h 이 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0인 조건에서 흠막이 굴착단계에 따른 지반 및 구조물의 거동, 균열형상, 거동평가 인자등을 평가하여 분석 하였다. 그림 6 및 7은 조적식 및 프레임 구조물의 경우의 L/h 이 3인 대표적인 결과이다. BAY-1에서 L/h 이 2.0, 3.0인 경우 0.33H 굴착단계에서 구조물의 수직변위는

지반변위에 비해 약 9% 작게 나타나고 있으며, 그리고, BAY-2와 BAY-3 에서는 L/h 이 3.0인 경우 구조물의 수직변위가 지반변위에 비해 17%~57% 작게 나타나고 있으며, L/h 이 2.0인 경우에는 약 12% 작게 나타나 구조물의 형상비가 클수록 BAY에 따른 구조물의 거동차이가 크게 나타남을 확인하였다. 그리고, 지반거동이 크게 발생하는 구간에서는 구조물 거동 또한 예민하게 반응을 보이며, 지반거동이 작게 발생하는 영역에서는 구조물 거동이 지반거동에 비해 보다 작게 평가 됨을 알 수 있다. 이는 구조물의 거동이 지반거동에 의한 영향에 크게 좌우되고 있음을 알 수 있어, 지반거동에 따라 구조물의 거동이 예민하게 반응하는 조적조 구조물의 경우, 구조물의 BAY에 따른 평가가 보다 정밀하고 구체적으로 이루어져야 함을 알 수 있다. 구조물의 손상거동을 굴착진행시 BAY에 따라 구조물에 발생된 균열폭으로 평가하면, BAY-1에서는 L/h 이 커질수록 그 영향이 보다 크게 나타났으며, 손상정도가 Burland 등(1977)이 제시한 수준과 비교해 보면 굴착깊이가 0.33H 까지는 매우 미세한 손상수준에서 약간손상 수준의 범위를 나타내고, 0.67H에서는 약간손상 수준에서 일부 보통손상 수준범위에 나타나 굴착단계에 따라 그 손상정도가 매우 다르게 평가되므로 흠막이 굴착단계에 따른 균열폭 크기 변화 또한 구조물의 손상 거동평가에 중요한 대상이 될 수 있음을 확인하였다. 그리고 굴착초기에 발생된 균열은 굴착단계가 진행됨에 따라 균열폭과 범위가 점차 증가되며, 굴착단계가 진행됨에 따라 새로운 균열이 발생하는 것보다는 초기에 균열이 발생된 취약부에서부터 지속적으로 그 영향이 확대되고 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 그림 7을 보면 프레임구조물의 지반/구조물의 거동은 구조물의 강성으로 인하여 굴착 0.67H 까지는

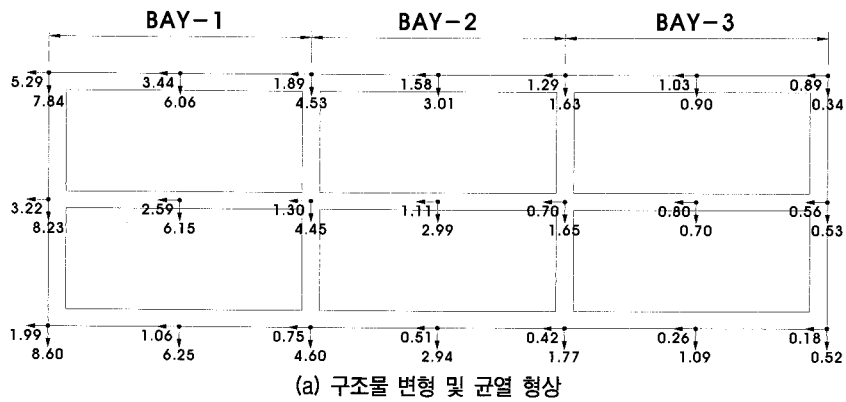


(a) 구조물 변형 및 균열 형상

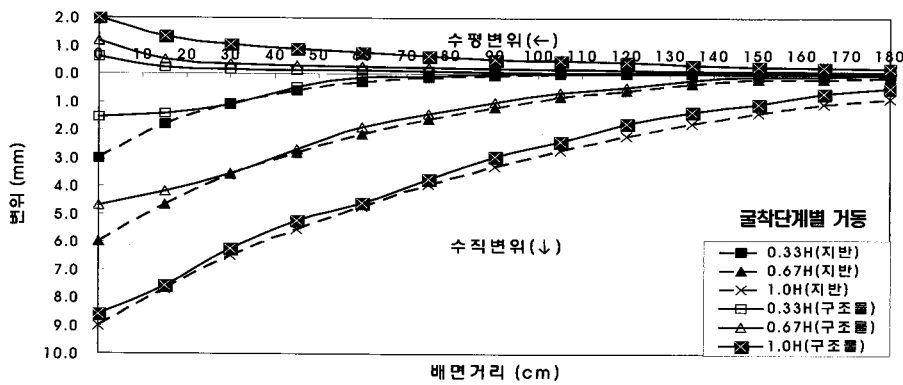


(b) 지반 및 구조물의 거동

그림 6. 굴착 단계에 따른 지반 / 구조물의 거동평가 ( $L/h=3.0$ ,  $x/H=0$ , 1.0H 굴착시, 조적구조물)



(a) 구조물 변형 및 균열 형상



(b) 지반 및 구조물의 거동

그림 7. 굴착 단계에 따른 지반 / 구조물의 거동평가 ( $L/h=3.0$ ,  $x/H=0$ , 1.0H 굴착시, 프레임 구조물)

조적식구조물과 달리 지반거동에 의한 영향에 최대한 저항하고 있으며, 0.67H 이상 굴착에서는 지반거동과 유사하게 나타나고 있다. 그러므로, 프레임구조물의 경우 굴착단계 0.67H 시점부터는 구조물의 거동에 대하여 보다 세밀한 평가가 이루어져야 할 것이다.

### 3.2 손상평가 인자들에 의한 영향

#### 3.2.1 굴착단계에 따른 $\beta/GS$ 의 변화

구조물의 형상비(L/h)와 이격거리비(X/H)에 따른 구조물의 거동을 각변위( $\beta$ )로 평가시에 지반과 상부구조물간의 상호거동을 평가하기 위하여 지반의 경사(GS)로 정규화된 각변위( $\beta/GS$ )의 변화를 통해 흙막이 굴착단계에 따른 거동을 분석하였다. 그림 8을 보면, 흙막이 굴착단계에 따른 구조물의 정규화 각변위( $\beta/GS$ )는 L/h 이 클수록 거동변화가 크며, 동일형상비에서는 이격거리비(X/H)가 작을수록 크게 나타나고 있다. 한편, 굴착깊이비(H'/H)가 증가할수록 정규화각변위( $\beta/GS$ )는 0.15~0.65의 범위로 지반의 경사(GS)에 비해 약 15%~65% 수준으로 구조물의 각변위가 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 구조물의 정규화각변위( $\beta/GS$ )는 굴착 깊이비(H'/H) 0.67을 기준으로 하여 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 굴착깊이비(H'/H)에 따른 정규화각변위( $\beta/GS$ )의 관계는 식 (1) ~ 식 (5)와 같이 형상비(L/h)

조건에 따른 관계식으로 나타낼 수 있다. 이들 관계식은 굴착진행 단계에 따른 각변위와 지반거동과의 관계를 형상비 조건에 따라 사전에 평가할 수 있어 굴착진행시 발생가능한 손상거동 예측으로 문제 발생전의 보완대책 평가에 활용될 수 있고, 또한, 구조물의 각변위 평가로 하부지반 거동에 대한 예측을 가능하게 할 것이다.

L/h=1.0, H'/H<0.67 인 경우,

$$\beta / GS = 0.02 (H' / H) - 0.003 \quad (1)$$

L/h=1.0, H'/H ≥ 0.67 인 경우,

$$\beta / GS = 0.07 (H' / H) - 0.23 \quad (2)$$

L/h=1.5 인 경우,

$$\beta / GS = 0.06 (H' / H) + 0.01 \quad (3)$$

L/h ≥ 2.0, H'/H < 0.67 인 경우,

$$\beta / GS = 0.06 (H' / H) + 0.11 \quad (4)$$

L/h ≥ 2.0, H'/H ≥ 0.67 인 경우,

$$\beta / GS = 0.1 (H' / H) - 0.04 \quad (5)$$

#### 3.2.2 굴착단계에 따른 $\beta/(\Delta/L)$ 에 대한 평가

구조물의 형상비(L/h)와 이격거리비(X/H)에 따른 구조물의 거동을 각변위( $\beta$ )로 평가시에 단계별 굴착시 구조물의 처짐비( $\Delta/L$ )와 각변위( $\beta$ )의 관계를 그림 9와 같이 평가하였다. 그림 9를 보면, 흙막이 굴착단계에 따른 처짐비에 의한 구조물의 정규화각변위( $\beta/(\Delta/L)$ )는 L/h

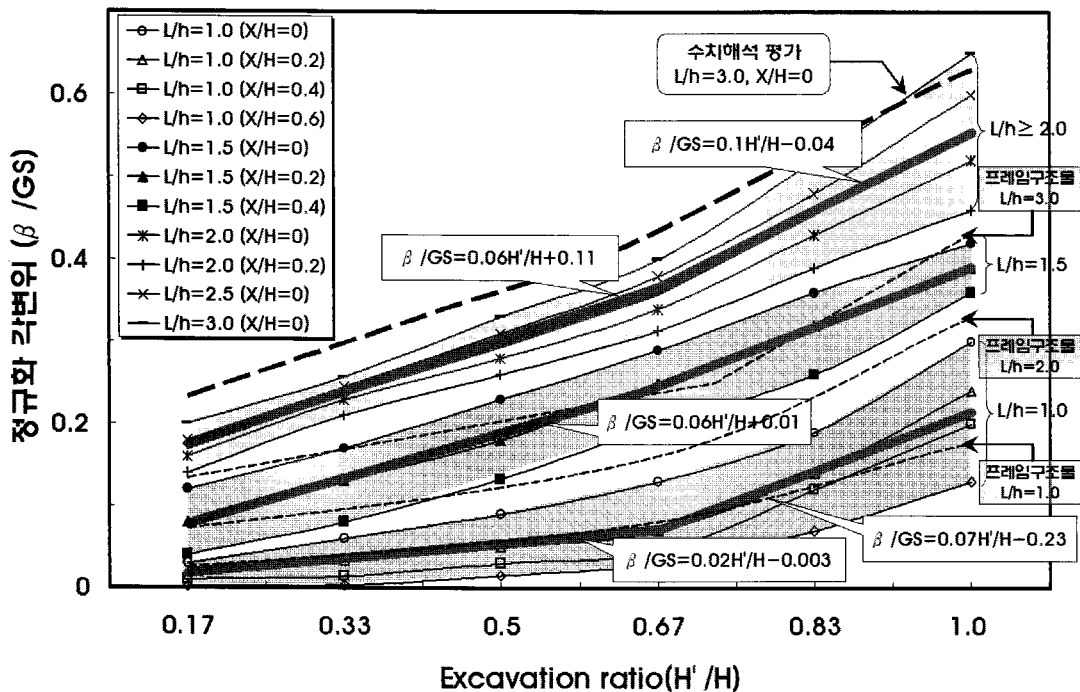


그림 8. 정규화된 각변위의 변화

이 클수록 거동변화가 크게 나타나며, 동일형상비에서는 이격거리비(X/H)가 작을수록 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그리고 굴착깊이비(H'/H)가 증가할수록 처짐비에 의한 구조물의 정규화각변위( $\beta/(\Delta/L)$ )는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 굴착깊이비(H'/H)에 따른 처짐비에 의한 정규화각변위( $\beta/(\Delta/L)$ )의 선형적인 관계는 형상비(L/h) 조건에 따라 식(6) ~ 식(9)와 같이 얻을 수 있었다. 이와 같은 관계식은 굴착진행 단계에 따른 구조물의 각변위나 처짐비의 관계를 형상비 조건에 따라 사전에 평가할 수 있으며, 일반적으로 계측에 의해 손쉽게 측정되는 구조물의 각변위를 평가한 후 손상평가 인자로서 활용하기 위해 구조물의 처짐비( $\Delta/L$ ) 평가에 유용하게 적용될 수 있다.

L/h=1.0 인 경우,  

$$\beta/(\Delta/L) = 0.27(H'/H) - 0.4 \quad (6)$$

L/h=1.5 인 경우,  

$$\beta/(\Delta/L) = 0.42(H'/H) - 0.19 \quad (7)$$

L/h=2.0 인 경우,  

$$\beta/(\Delta/L) = 0.48(H'/H) + 0.31 \quad (8)$$

L/h ≥ 2.5 인 경우,  

$$\beta/(\Delta/L) = 0.97(H'/H) - 0.06 \quad (9)$$

### 3.3 구조물 손상도표에 의한 평가

#### 3.3.1 수평변형율과 처짐비에 의한 구조물의 손상

구조물의 형상비(L/h)와 이격거리비(X/H)에 따른 구조물의 손상거동 평가를 굴착단계에 따라 비교 평가하였으며, 이를위해 그림 10과 같이 수평변형율( $\epsilon_{lat}$ )과 처짐비( $\Delta/L$ )의 관계 도표를 통해 분석하였다. 그림 10을 보면, 굴착이 진행됨에 따라 구조물의 손상정도는 구조물의 형상비(L/h)와 이격거리비(X/H)의 영향으로 인하여 무시수준에서 보통 손상수준정도 까지로 변화되고 있음을 알 수 있다. 그리고 구조물의 형상비(L/h)에 따른 손상수준을 평가하면, L/h 이 1.0에서 3.0으로 커질수록 굴착단계에 따른 손상은 보다 크게 나타나며, L/h 이 1.5 이상인 경우에는 수평변형율에 의하여 손상수준이 결정되는 경향을 보이며, 형상비가 점차 작을수록 수평변형율과 처짐비에 의한 영향으로 손상수준이 결정되는 경향을 보이고 있다. 그리고, 흙막이굴착 진행시 형상비에 따른 손상수준은 그림 10에 나타난 것과 같이 예측할 수 있는 방향성을 가지고 있으며, 이를 통해 굴착진행 단계에 따른 손상수준을 예측하여 굴착에 따른 구조물의 손상발생에 대하여 사전에 평가할 수 있어 문제가 예상되는 경우에 다양한 대책등이 강구될 수 있을 것이다.

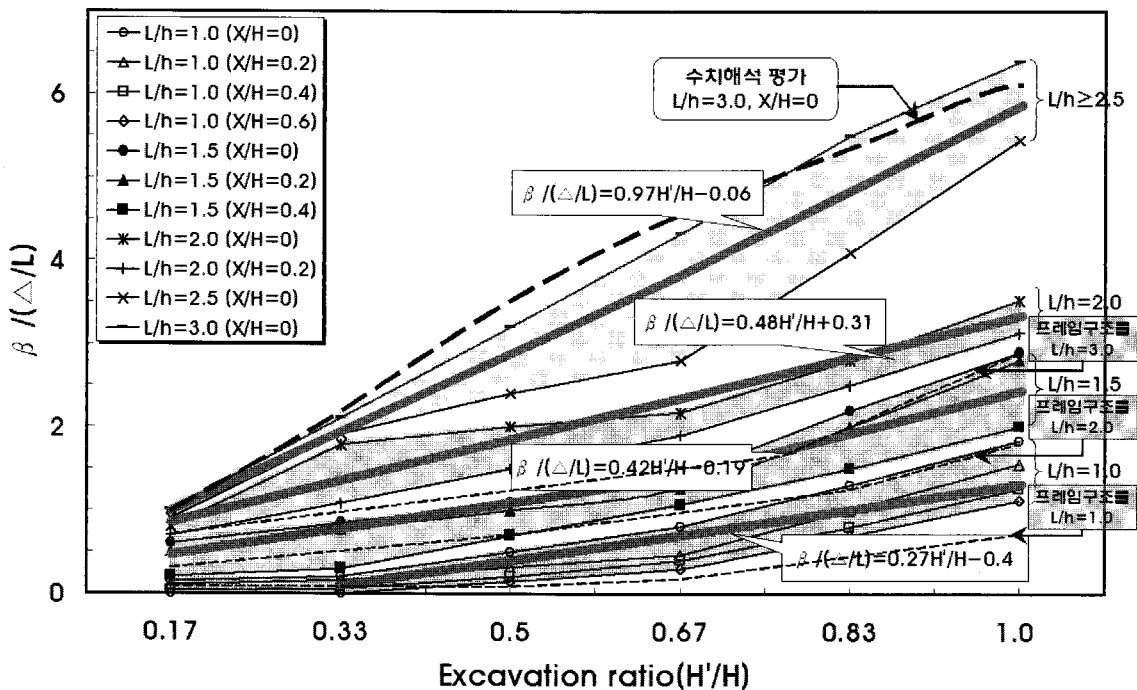


그림 9. 굴착단계에 따른  $\beta/(\Delta/L)$ 의 변화



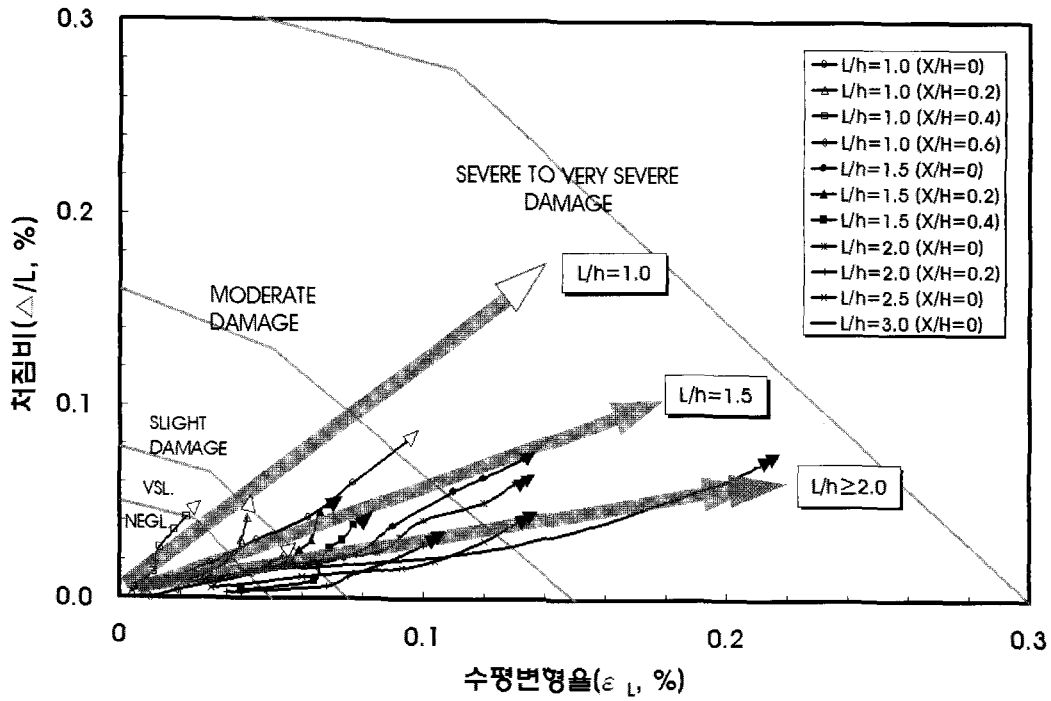


그림 10. 수평변형률과 치짐비에 의한 구조물 손상평가

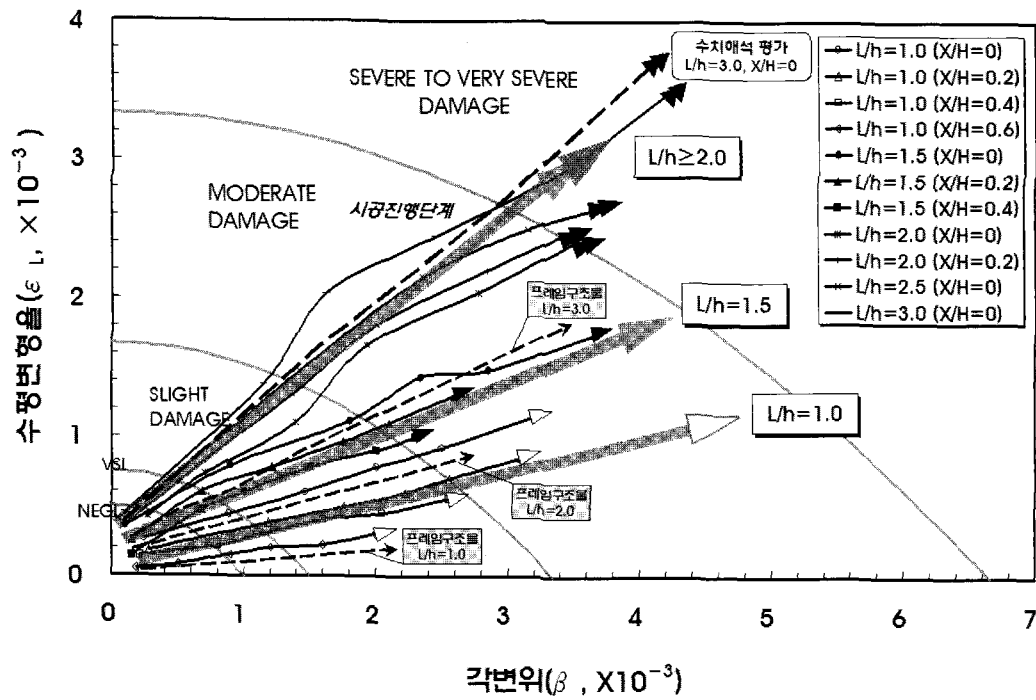


그림 11. 각변위와 수평변형률에 의한 구조물 손상평가

### 3.3.2 각변위와 수평변형률에 의한 구조물의 손상

구조물의 형상비(L/h)와 이격거리비(X/H)에 따른 구조물의 손상거동을 굴착단계에 따라 비교 평가하였으며, 이를위해 각변위( $\beta$ )와 수평변형률( $\epsilon_{lat}$ )의 관계 도표를 통해 분석하였다. 그림 11을 보면, 굴착이 진행됨에 따라 구조물의 손상정도는 구조물의 형상비(L/h)와 이

격거리비(X/H)의 영향으로 인하여 약간손상수준에서 매우 심각한 수준 정도까지로 변화되고 있음을 알 수 있다. 그리고, 구조물의 형상비에 따른 손상수준을 평가하며, 형상비가 1.0에서 3.0으로 커질수록 굴착단계에 따른 손상수준은 크게 나타나며, 형상비가 2.0 이상인 경우에는 수평변형률에 의한 손상평가 인자영향에 의

해 손상수준이 결정되는 경향을 보이며, 형상비가 작을 수록 각변위에 의한 영향으로 손상수준이 결정되는 경향을 보이고 있다. 그리고, 흠막이 굴착 진행시 형상비에 따른 손상수준은 그림 11에 나타낸 것과 같이 예측할 수 있는 방향성을 가지고 있으며, 이를 통해 굴착진행 단계에 따른 손상수준을 예측하여, 굴착에 따른 구조물의 손상발생에 대하여 사전에 평가할 수 있어 문제가 예상되는 경우에 다양한 대책등이 강구될 수 있을 것이다. 한편, 형상비에 따른 프레임구조물의 각변위와 수평변형률에 의한 평가를 보면 굴착단계에 따라 손상수준은 증가되어 조적구조물의 거동에 비해 각변위에 의한 영향이 비교적 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그러므로, 조적구조물과 프레임구조물등의 구조물 형식등에 따라 그 손상수준은 달라짐을 확인하였다.

### 3.3.3 균열크기가 고려된 구조물의 손상평가

손상도표에 의한 구조물의 손상수준 평가시 보수적이고 안전측으로 구조물을 평가하기 위해서는 각변위와 수평변형률 관계도표가 주로 활용되어야 할 것으로 판단되었다. 그리고 본 손상도표에서 굴착단계에 따라 구조물에 발생된 균열에 의한 손상수준을 그림 12와 같이 표시하여 평가해 보았다. 그림 12를 보면, 형상비가 2.0 이상인 구조물에서 각변위와 수평변형률 도표에서는 보통손상 수준으로 평가된 경우가 균열에 의한 평가

시 심각한 수준으로 평가되었으며, 또한 약간손상수준으로 평가된 경우가 균열에 의한 평가시 보통손상 수준으로 평가되었다. 이와 같은 결과로 각변위와 수평변형률의 손상도표에 의한 평가시 균열에 의한 평가가 포함된 손상수준 평가가 동시에 이루어져야 할 것으로 판단되며, 형상비가 2.0 이상인 경우에 손상도표 사용시 균열에 의한 “SEVERE CRACK ZONE”과 “MOD. CRACK. ZONE” 영역에 위치하는 경우에는 주의깊게 평가되어야 할 것이다.

## 4. 결론

도심지에서 흠막이굴착에 의한 단계별 지반거동을 평가하여 인접한 구조물의 형상비(L/h), 이격거리(X), 편심거리(E), 교차각(SA)에 따른 구조물의 손상거동변화를 규명하고자 모형실험을 수행하였다. 굴착단계에 따른 지반과 구조물의 상호거동 변화, 손상평가 인자들에 의한 영향, 구조물의 손상메카니즘 평가, 구조물 손상도표에 의한 평가 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 흠막이굴착에 따른 인접구조물의 손상수준 평가시 구조물의 형상비(L/h), 굴착단계, 이격거리(X)등에 따라 구조물의 손상수준은 현저히 다르게 나타남을

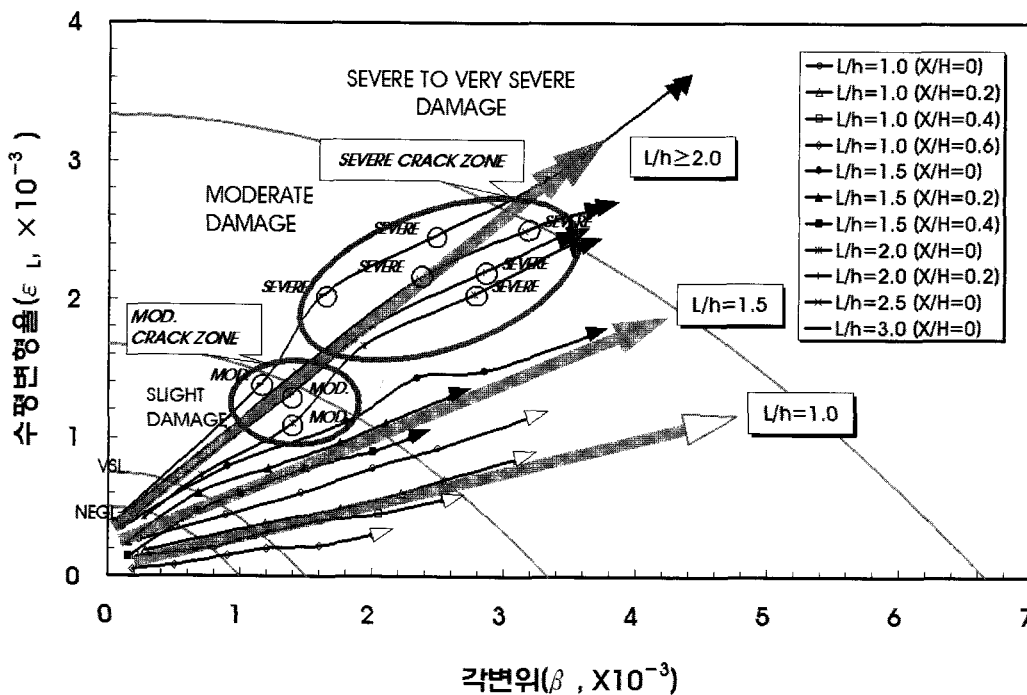


그림 12. 균열크기가 고려된 구조물 손상평가(흠막이굴착 모형실험)

확인하였으며, 구조물의 손상평가지에는 제안된 다양한 거동평가 인자를 통해 평가가 이루어져야 하며, 특히 구조물중 가장 취약한 구간(BAY)에 따른 평가가 시공초기에 보다 세밀하고 구체적으로 분석되어야 할 것으로 판단된다.

- (2) 구조물의 각변위와 지반거동과의 관계를 평가할 수 있는 지반경사에 의한 정규화각변위( $\beta/GS$ )를 산정할 수 있는 관계식(식 (1)~(5))을 제안하였다. 제안된 관계식은 굴착진행에 따른 각변위와 지반거동과의 관계를 사전에 평가하여 시공중 발생 가능한 손상의 범위를 예측함으로써 인접구조물의 손상 발생전의 보완대책의 여부를 평가하는데 활용할 수 있다.
- (3) 구조물의 형상비, 이격거리, 굴착시공단계가 고려된 처짐비에 의한 정규화각변위( $\beta/(\Delta/L)$ )를 산정할 수 있는 관계식(식 (6)~(9))을 제안하였다. 제안된 관계식은 굴착진행에 따른 각변위로 구조물의 처짐비 산정이 가능하며, 시공중 발생가능한 손상수준을 평가함으로써 인접구조물의 손상 발생전의 보완대책의 여부를 평가하는데 활용될 수 있다.
- (4) 구조물의 형상비(L/h), 시공진행단계, 이격거리(X), 편심거리(E) 변화에 따라 손상수준이 추적 가능한 수평변형율( $\epsilon_L$ )과 처짐비( $\Delta/L$ ), 각변위( $\beta$ )와 수평변형율( $\epsilon_L$ ) 손상도표를 제안하였으며, 구조물의 형상비에 따른 굴착 시공단계별 손상수준을 예측할 수 있는 방향성을 확인할 수 있었다. 그리고, 굴착진행 단계에 따른 구조물의 손상 거동 평가시 인접구조물이 밀집된 도심지 굴착에서는 보다 안전하고 보수적인 평가가 나타나는 각변위와 수평변형율에 의한 손상도표를 활용하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다.
- (5) 모형실험시 구조물에 발생된 균열의 손상수준을 손상도표에서 평가해 본 결과, 균열손상 수준이 적용된 평가가 각변위와 수평변형율만 적용된 손상수준보다 안전측으로 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 각변위와 수평변형율 뿐만 아니라 균열이 고려된 손상평가를 수행하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 신은철, 신동훈, 오영인 (2000), 흙막이 굴착에 따른 인접지반 및 구조물의 거동, *대한토목학회 논문집(II)*, pp.285-288.
2. 양구승, 김병모 (1997), 도심지 깊은 굴착으로 발생하는 인접지반 지표침하 분석, *한국지반공학회지*, 제13권, 제2호, pp.101-124.
3. 유충식 (2001), 터널시공에 따른 지반거동에 의한 지중매설관 손상평가, *한국지반공학회 논문집*, 제17권 4호, pp.71-86.
4. Boscardin, M. D. and Cording, E. J. (1989), "Building Response to Excavation Induced Settlement", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.1, pp.1-21.
5. Burland, J. B. and Wroth, C. P. (1974), "Settlement of Buildings and Associated Damage", *Proceedings of a Conference on Settlement of Structures*, Cambridge, pp.611-654.
6. 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.
7. Boone, S. J. (1996), "Ground Movement Related Building Damage", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.11, pp.886-896.
8. Boone, S. J., Westland, J. and Nusink, R. (1999), "Comparative Evaluation of Building Response to an Adjacent Braced Excavation." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.210-223.
9. Boscardin, M. D., Cording, E. J. & O'Rourke, T. D. (1978), "Case studies of Building Behavior in Response to Adjacent Excavation", *U. S. Department of Transportation*.
10. Boscardin, M. D. and Cording, E. J. (1989), "Building Response to Excavation-Induced Settlement, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.1, pp.1-21.
11. Burland, J. B., Broms, B. and De Mello, V. F. B. (1977), "Behaviour of Foundations and Structures" *SOA Report, Session 2, Proc. 9th Int. Conf. SMFE*, Tokyo, pp.495-546.
12. Potts, D. M. and Addenbrooke T. I. (1997), "A Structure's Influence on Tunnelling Induced Ground Movements", *Proc. Int. Civil. Eng., Getech. Eng.*, pp.109-125.
13. Peck, R. B. (1969), "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground", *SOA Report, 7th Int. Conf. SMFE*, Mexico City, State of the Art Volume pp.225-290.
14. Wahls, H. E. (1981), "Tolerable Settlement of Buildings", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.107, No.11, pp.1489-1504.

(접수일자 2007. 5. 4, 심사완료일 2007. 10. 11)