

터널굴착에 따른 인접건물의 거동평가에 대한 모형실험연구

황의석^{1*}, 김학문²

Model tests for the behavior assessment of adjacent buildings in urban tunnelling

Eui-Suk Hwang, Hak-Moon Kim

Abstract This study is to investigate the damage assessment of adjacent structures due to tunneling in urban environment. Model tests were carried out with two-story masonry building 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. The results of model tests were plotted on the damage level graphs in order to predict the direction of damage levels for the different types of structures (i.e. stiffness of structures, L/h). 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.

Keywords: Damage assessment, adjacent building, urban tunnelling, damage level

요 지 본 연구는 터널굴착 공사에 의한 지반거동을 평가하여, 구조물의 형상, 위치, 굴착공정 변화등의 다양한 조건과 지반구조물의 상호작용이 고려된 모형실험을 기본으로 수행하였다. 굴착진행 단계에 따른 구조물의 손상 거동 평가시 인접 구조물이 밀집된 도심지 굴착에서는 보다 안전하고 보수적인 평가가 나타나는 각변위와 수평변형률에 의한 손상도표를 활용하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다. 모형실험시 구조물에 발생된 균열의 손상수준을 손상도표에서 평가해 본 결과, 균열손상 수준이 적용된 평가가 각변위와 수평변형률만 적용된 손상수준보다 안전측으로 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 각변위와 수평변형률 뿐만 아니라 균열이 고려된 손상평가를 수행하는 것이 보다 바람직한 것으로 판단된다.

주요어: 손상평가, 인접건물, 도심지 터널, 손상수준

1. 서 론

1.1 연구 배경

일반적으로 터널굴착 공사에 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 간과해서는 안 될 것이다.

이와같이 도심지에서의 굴착공사는 본 구조물 자체를

안전하게 시공함은 물론이고 인접구조물에 대한 영향이 최소화 되어야 한다는 전제조건이 중요한 사항이다.

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

그러므로 터널굴착등의 지반굴착 공사시 인접구조물의 안정성 평가는 점차 그 중요성이 대두되고 있으며, 최근에는 지반굴착시 지반거동과 인접구조물의 상호 거동에 대한 수치해석, 모형실험, 현장계측결과에 의한 연구가 이루어 지고 있으며, 구조물의 형상, 위치, 굴착공정 변화등의 다양한 조건 및 지반구조물의 상호작용에 따른 구조물의 거동 및 손상정도를 사전에 예측하여 필요 시 대책을 마련하는 체계적인 연구가 필요할 것이다.

¹정회원, 대림산업(주) 기술연구소 대리

²정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수

*교신저자: 황의석 (hwangysuk@empal.com)

1.2 연구 동향

터널굴착과 관련된 연구는 터널구조물 자체의 안정성 평가외에 주변지반의 거동연구에 대하여 다양한 방향으로 연구가 체계적으로 수행되어 greenfield 상태에서의 지반거동 예측과 현장 계측자료를 통한 지반 및 구조물의 거동을 평가 비교하여 구조물의 손상거동 연구등이 수행되고 있으나, 구조물의 형상, 구조물의 위치등의 다양한 변화조건과 지반/구조물의 상호작용을 고려한 연구결과는 미진한 상태이다.

김창용(1999)은 특정한 지반조건과 시공조건에 대하여 지반변위의 크기와 분포를 예측하고 예측된 지반거동에 상응하는 인접구조물들의 잠재적 손상을 평가하기 위해 지상에 존재하는 건물의 기하학적 특성과 위치적 특성을 고려한 손상평가 방법에 초점을 두었으며 이를 터널굴착시 발생할 수 있는 지표침하 거동 예측결과를 기반으로 예측할 수 있는 지상 건물의 손상평가 인자들로 뒤뜰각, 처짐비, 건물의 최대침하량, 부등침하량, 수평변형율을 도입하여 기존의 보수적인 해석방법을 좀 더 발전시켜 3차원적으로 표현하고자 하였다.

유충식 등(2000)은 터널시공으로 인한 인접건물 영향 기법을 제시하고자 터널상부에 조적식 5층 건물이 존재할 경우에 대한 유한요소 해석을 수행하여 기존 손상평가 방법의 적용성을 고찰하였으며, 유한요소 해석시 건물의 손상평가에 적용한 주 인장 변형율에 대한 평가와 아울러 crack 모델 적용에 대한 보다 실질적인 검토가 이루어져야 한다고 제안하였다.

손무락(2003)은 구조물에서 일어날 수 있는 각변형(angular distortion, β)을 지반침하 기울기 변화(ΔGS), 지반/구조물의 상대적인 강성도, 구조물의 강도, 하중을 고려해서 지반침하 기울기 변화에 대한 상대적인 크기($\beta/\Delta GS$)로서 구할 수 있는 방법을 제시하였으며, 터널 굴착으로 인한 인접구조물의 영향을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 현장지반조건과 시공조건에 따른 지반변위 거동과 지반/구조물 상호작용에 대한 중요성 및 지반변위와 인접구조물의 거동에 대한 지속적인 계측, 관찰 및 연구가 필요하다고 제안하였다.

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

초기에는 주로 지반거동과 동일하게 구조물의 손상거동을 예측 평가 하였으며 광산굴착, 터널굴착, 흙막이 굴착등의 현장자료 분석 및 실내 모형실험을 주로 수행하였다. 구조물의 손상평가 인자로서는 침하량, 각변위, 수평변형율, 처짐비등의 영향인자들을 고려하여 이들의 상호관계를 통해 구조물의 손상정도를 평가 예측하였다.

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 모래지반 및 점토지반 등 다양한 지반에서 시공된 터널 계측자료의 분석결과를 토대로 터널 굴진방향과 직교하는 횡단면에서의 지표침하가 정규확률분포(normal probability distribution)의 형태로 나타남을 제시하였다.

Meyerhof(1953)는 open frame의 인접한 기둥사이의 허용 각변위를 1/300, wall panels과 같은 building frames의 인접한 기둥사이의 허용각변위는 1/1000정도로 제안하였다.

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 인장변형율의 값이 0.0005~0.00075정도임을 밝힌 바 있다. 또한 Meyerhof(1956) and Wahls(1981)등은 각종 실험 및 계측을 통해서 건물의 임계 인장변형율을 제안하였다.

Boscardin and Cording(1989)은 현장사례 연구를 통해 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. 터널굴착에 따른 인접구조물의 거동 모형실험

2.1 실험 개요

본 연구에서 수행한 실험은 터널 굴착시 막장 진행에 따른 greenfield 상태에서 지반의 침하량을 이론적으로 계산하여, 그 계산된 지반 침하량을 지상의 인접구조물에 적용할 때 발생하는 구조물의 손상영향을 분석 평가하기 위한 것이다. 또한, 터널막장 위치로부터 구조물 중심까지의 이격거리, 구조물의 길이, 터널 굴진축과 구조물의 교차각 변화등에 따른 구조물의 손상 영향에 대하여 실험적으로 고찰하여 이를 정량적으로 분석하였다.

터널 굴착에 따른 인접구조물의 손상영향 평가를 위해 사질토 지반에서 직경 10 m의 단선 원형터널을 굴착심도 10 m로 가정하여, 터널 막장의 진행에 따른 침하량을, 터널 횡단면에 대해서는 Peck(1969)과 Schmidt(1969)가 경험적으로 제시한 Gauss 정규확률 분포곡선으로, 터널 종단면에 대해서는 Attewell and Woodman(1982)이 경험적으로 제시한 누적정규분포곡선으로 값을 산정

하여 지반침하로 적용하였다.

그림 1은 균질한 사질토지반에서 매트(mat) 기초위에 2층 조적식 구조물(18 m(L)×6 m(h))이 위치해 있을 때 굴착 심도 10 m에서 단선 원형터널의 막장이 0.5D(터널직경)씩 진행되어갈 때의 지반 침하 형상을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 균질한 사질토 지반에서의 터널 굴착시 터널 막장이 진행됨에 따른 지상의 인접구조물에 미치는 손상영향을 연구하기 위하여 표 1과 같이 터널막장

표 1. 모형실험 종류

터널조건	L/h	편심거리, E	교차각	비고
터널심도: 10 m 터널직경: 10 m	1	0	0	T-1
			15	T-2
			45	T-3
			75	T-4
	1	0.25	0	T-5
			15	T-6
			45	T-7
			75	T-8
	1	0.5	0	T-9
			15	T-10
			45	T-11
			75	T-12
3	2	0	0	T-13
			15	T-14
			45	T-15
			75	T-16
	2	0.25	0	T-17
			15	T-18
			45	T-19
			75	T-20
	2	0.5	0	T-21
			15	T-22
			45	T-23
			75	T-24
3	0	0	T-25	
		15	T-26	
		45	T-27	
		75	T-28	
3	0.25	0	T-29	
		15	T-30	
		45	T-31	
		75	T-32	
3	0.5	0	T-33	
		15	T-34	
		45	T-35	
		75	T-36	

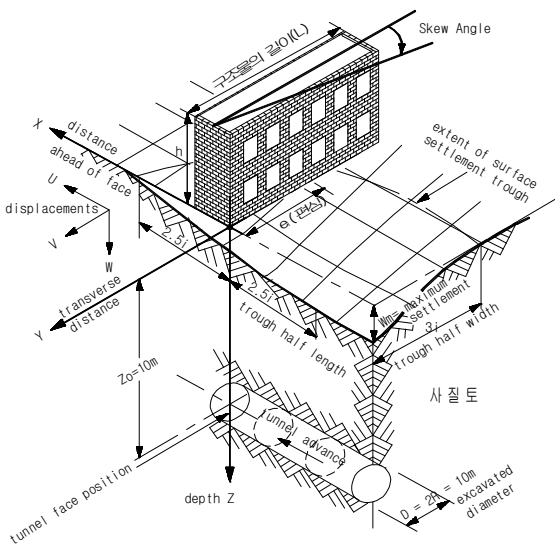


그림 1. 모형실험을 위한 가정단면

여기서, 편심거리 $E=ei/L$ (ei =편심, L =구조물 길이, h =구조물 높이)

위치로부터 구조물 중심까지의 이격거리, 구조물의 길이, 터널굴진축과 구조물의 교차각등의 변화에 따라 실험을 수행하였다.

본 실험에서 지반침하하는 건물의 강성등의 변화에 따라 하부지반의 거동이 매우 달라지므로 건물이 없는 경우의 침하를 적용시켜 지반과 건물의 상호거동등을 평가 연구하였다.

2.2 조적식 구조물의 모델링

조적구조물 축조시 중요한 사항은 개개의 벽돌과 벽돌 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.

(1) 지반조건 및 기초

본 실험에서 적용된 지반은 사질토이며, 사용된 모래는 주문진 표준사를 사용하였다. 조적식구조물 벽체 하부와 기초지반사이에 구조물의 기초는 강성을 무시할 정도로 최소로 하여 지반과 유사하게 거동하게 하기위해 모르타르를 얇게 타설하여 연성기초로 제작하였다.

(2) 모형벽체 벽돌

모형실험 벽체에 사용될 벽돌은 현재 현장에서 사용하는 시멘트형 표준벽돌규격인 190 mm×90 mm×57 mm를 적용하여 본 벽돌의 약 1/4로 축소해서 자체 제작하였다. 모형실험에 사용된 벽돌의 규격은 길이 48 mm×폭 23 mm×높이 15 mm이며, 벽돌제작은 배합비를 달

리하여 현장에서 사용되는 표준형 벽돌의 강도와 단위중량을 고려하여 표 2와 같이 선정하였다.

(3) 줄눈재

벽돌과 벽돌사이에 사용될 줄눈을 일반 시멘트와 물의 배합으로 사용할 경우, 모형실험시에는 벽돌과의 점착 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 2와 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.

(2) 변위 및 균열측정장치

스크류잭을 이용하여 정확한 지반의 침하량을 유발시키기 위하여 디지털식 변위 측정기(정밀도: 0.001 mm)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

표 2. 벽돌의 물성치

항 목	단위중량(kN/m ³)	일축압축강도(MPa)	탄성계수(MPa)
실험치	20.4	16.5	208.4

표 3. 줄눈재의 물성치

항 목	단위중량(kN/m ³)	일축압축강도(MPa)	점착인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)
실험치	17.5	0.47	0.03	48.7

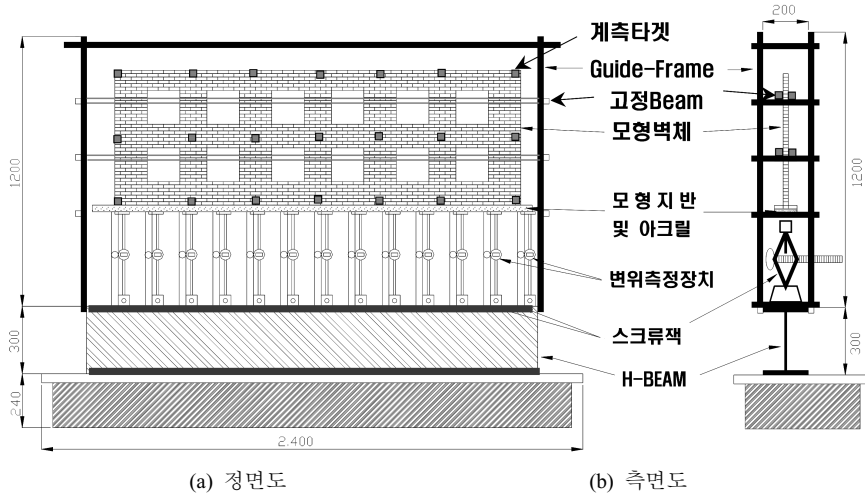


그림 2. 지반침하 발생 모형실험장치 상세도(조적식구조물)

크기와 변화를 확인하였다.

3. 터널굴착에 따른 인접구조물의 손상평가

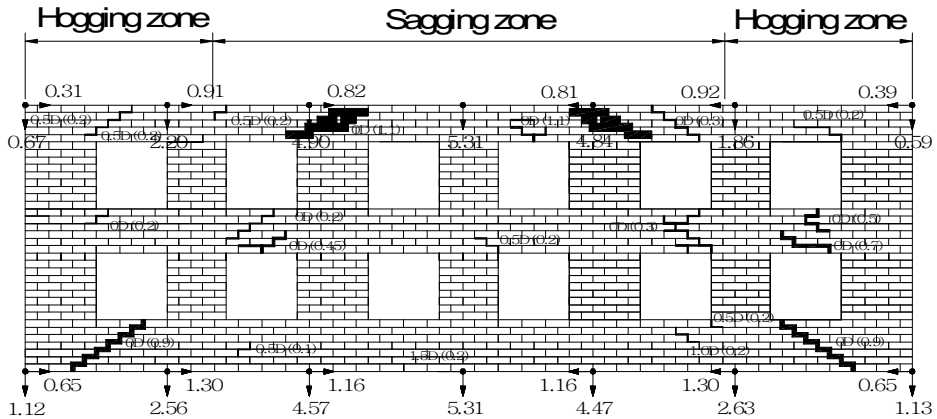
터널굴착시 막장이 진행됨에 따라 발생하는 지반침하량을 터널 횡단면은 Peck과 Schmidt(1969)가 제시한 정규확률 분포곡선으로 터널 종단면은 Attewell 등(1982)이 경험적으로 제시한 누적 정규분포곡선으로 지표침하량을 산정하였다. 모형실험시 계산된 지반거동을 구조물 하부지반에 발생시켜 지반 및 구조물의 정성적이고 정량적인 거동을 고찰 분석하였으며, 또한 지반거동에 따른 구조물의 손상정도를 규명하고자 하였다.

실험조건으로는 터널굴착시 막장의 위치변화, 구조물의 형상, 터널 굴진축과의 편심, 터널굴진축과 구조물의 교차각(skew angle)등을 변화시켰으며, 이에 따른 실험 결과를 분석하였다.

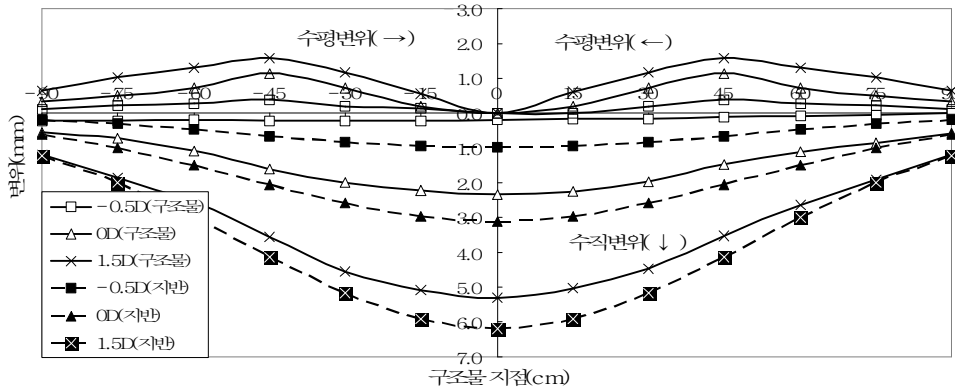
3.1 구조물의 형상에 따른 지반/구조물의 거동

터널굴착시 인접한 구조물의 높이(h)에 대한 구조물의 길이(L)비(형상비, L/h)에 따른 구조물의 손상 거동 변화를 평가하기 위하여, 대표적으로 형상비(L/h)가 1.0, 2.0, 3.0인 조건에서 터널 굴착단계에 따른 지반 및 구조물의 거동, 균열형상, 거동평가 인자등을 상호 비교 분석하였다.

그림 3을 보면, 터널막장 진행시 지반거동의 증가로 인하여 구조물의 거동 또한 점차 크게 발생되고 있다. 형상비가 3.0인 경우 구조물의 수직변위는 sagging 영역과 hogging 영역으로 나뉘어지며, sagging 영역에서는 15%, hogging 영역에서는 25%가 지반변위에 비해 작게 발생되며, 이들 영역에서의 구조물의 거동이 지반 거동에 비해 작게 평가됨을 알 수 있다. 그리고 막장위치가 구조물 전방 -0.5D에서 구조물의 직하부 통과후 1.5D로 진행할수록 구조물의 수직변위는 지반변위에 비해 50%, 25%, 14%로 점차 작게 나타났으며, 이는 막장이 진행됨에 따라 구조물의 거동이 점차 지반거동과 유사하게 거동됨을 알 수 있다. 그리고 형상비가 1.0인 경우에는 구조물의 수직변위는 sagging 영역내에 발생되며 막장위치에 따른 구조물의 수직변위는 지반변위에 비해 약 8~10% 정도 작게 나타나 막장진행에 따른 거동 차이가 그다지 크지 않았으며, 구조물의 거동 또한 초기 지반거동이 발생하는 단계부터 지반거동에 따라 민감하게 거동되는 것으로 나타났다. 이는 초기 막장진행에 따른 지반거동은 형상비가 큰 구조물 전체에 영향을 미치지 못하므로 지반거동영역밖의 구조물의 강성으로 지반거동에 저항함으로써 구조물의 거동이 작게 발생되었으며, 형상비가 작은 구조물은 발생하는 지반거동내에 위치하므로 막장진행 초기부터 지반거동에 따른 영향을 크게 받게 된다. 그리고 최종 굴착이 완료된 경



(a) 구조물 변형 및 균열 형상



(b) 지반 및 구조물의 거동

그림 3. 터널 막장위치에 따른 지반 / 구조물의 거동평가 (L/h=3.0, E=0, Skew angle=0°, 터널막장위치 1.5D)

우에는 형상비가 큰 구조물은 상대적인 지반거동 영향으로 구조물에 균열이 확대되면서 최종 지반거동과 유사하게 나타나게 된다. 그러므로, 지반거동에 따라 구조물의 거동이 비교적 예민하게 반응하는 조적조 구조물의 경우, 터널굴착시 구조물의 sagging 영역과 hogging 영역으로 구분되어 보다 정밀하고 구체적인 구조물 손상평가가 이루어져야 할 것이다.

한편, 터널막장 진행에 따른 균열거동은 막장이 진행됨에 따라 균열분포와 크기는 점차 확대되며, 특히 균열이 집중적으로 발생하는 부분은 수평변위가 최대로 발생하는 지점 및 지반거동의 sagging 영역과 hogging 영역의 구조물 부위에서 나타나고 있다. 또한 굴착초기 발생한 균열을 중심으로 그 크기 및 분포범위가 점차 확대

되어 초기에 균열이 발생된 본 손상 집중구간의 세밀하고 구체적인 평가가 필요할 것이다.

3.2 막장 진행에 따른 $\beta/(\Delta/L)$ 에 의한 평가

터널굴착시 구조물의 형상비(L/h)와 구조물의 편심거리(E) 및 교차각(skew angle)에 따른 $\beta/(\Delta/L)$ 의 변화는 각각 그림 4 및 그림 5와 같다.

그림 4를 보면, 터널굴착 진행에 따른 처짐비에 의한 구조물의 정규화각변위($\beta/(\Delta/L)$)는 형상비가 클수록 거동변화가 크게 나타나며 동일형상비에서는 편심거리가 클수록 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그리고 막장이 진행됨에 따라 처짐비에 의한 구조물의 정규화 각변위는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 막장진행에

다른 처짐비에 의한 정규화 각변위의 선형적인 관계는
 형상비 조건에 따라 식 (1)~식 (3)과 같이 산정된다.

$$\beta / (\Delta/L) = 0.84(X/D) + 0.40; L/h = 2.0 \quad (2)$$

$$\beta / (\Delta/L) = 1.32(X/D) + 0.43; L/h = 3.0 \quad (3)$$

$$\beta / (\Delta/L) = 0.52(X/D) - 0.09; L/h = 1.0 \quad (1)$$

이와같은 관계식은 막장진행 단계에 따른 구조물의

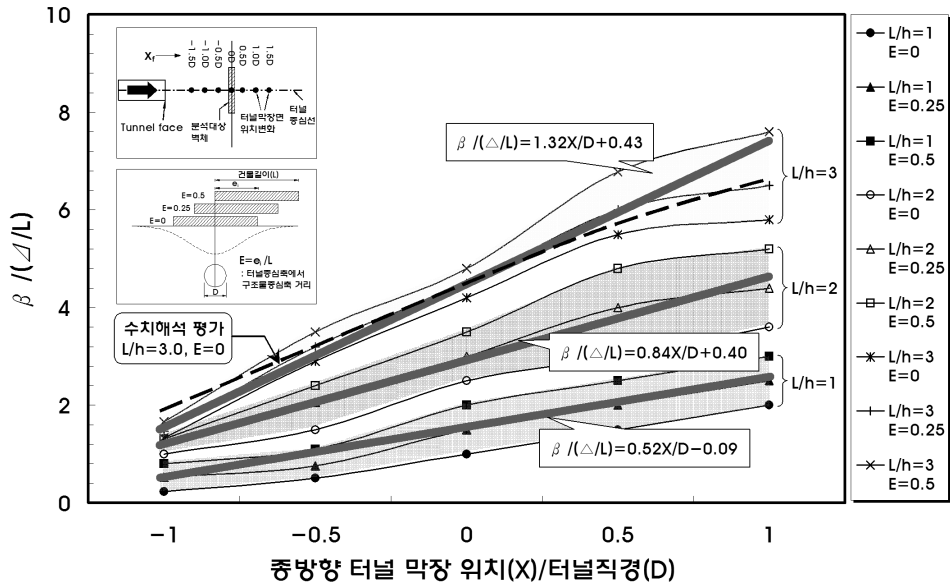


그림 4. 터널굴착시 형상비와 편심거리에 따른 $\beta / (\Delta/L)$ 의 변화

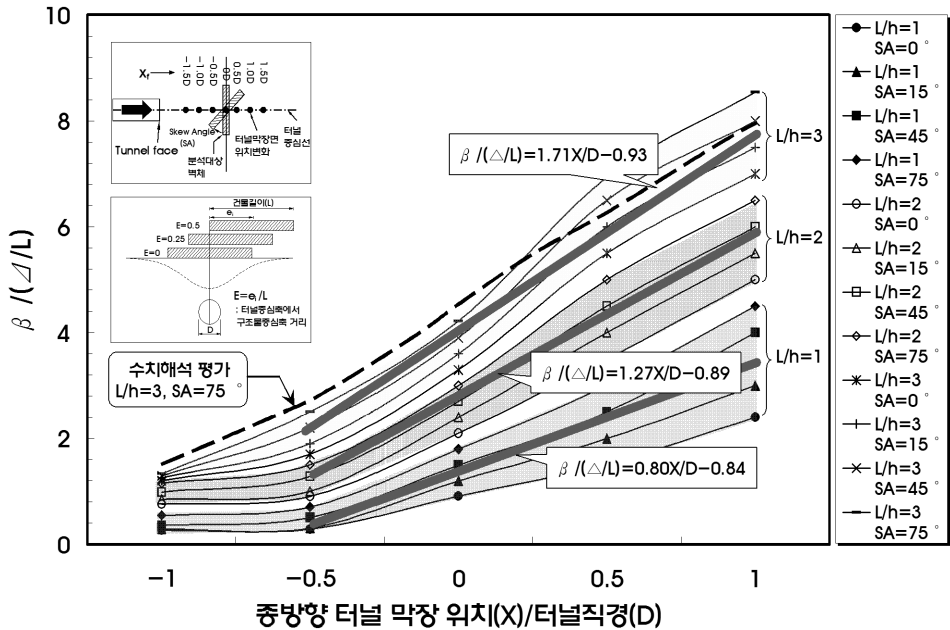


그림 5. 터널굴착시 형상비와 교차각(Skew Angle)에 따른 $\beta / (\Delta/L)$ 의 변화

각변위와 처짐비의 관계를 형상비 조건에 따라 사전에 평가할 수 있으며, 형상비 및 편심거리에 따른 구조물의 각변위를 평가한 후 손상평가 인자로서 구조물의 처짐비 평가시 이를 활용할 수 있을 것이다.

그림 5를 보면, 터널굴착 진행에 따른 처짐비에 의한 구조물의 정규화각변위($\beta(\Delta/L)$)는 형상비가 클수록 거동변화가 크게 나타나며 동일형상비에서는 교차각이 클수록 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그리고 막장이 진행됨에 따라 처짐비에 의한 구조물의 정규화 각변위는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 막장진행에 따른 처짐비에 의한 정규화 각변위의 선형적인 관계는 형상비 조건에 따라 식 (4)~식 (6)과 같이 얻을 수 있었다.

$$\beta(\Delta/L)=0.80(X/D)-0.84; L/h=1.0 \quad (4)$$

$$\beta(\Delta/L)=1.27(X/D)+0.89; L/h=2.0 \quad (5)$$

$$\beta(\Delta/L)=1.71(X/D)-0.93; L/h=3.0 \quad (6)$$

이와같은 관계식은 막장진행 단계에 따른 구조물의 각변위와 처짐비의 관계를 형상비 조건에 따라 사전에 평가할 수 있으며, 형상비 및 교차각에 따른 구조물의 각변위를 평가한 후 손상평가 인자로서 구조물의 처짐비 평가시 이를 활용할 수 있을 것이다.

3.3 인접구조물의 손상도표에 의한 평가

3.3.1 수평변형율과 처짐비에 의한 구조물 손상

구조물의 형상비(L/h)와 편심거리(E)에 따른 구조물의 손상거동 평가를 막장진행에 따라 비교 평가하였으며, 이를위해 수평변형율(ϵ_{lat})과 처짐비(Δ/L)의 관계 도표를 통해 분석하였다. 그림 6을 보면, 막장이 진행됨에 따라 구조물의 손상정도는 구조물의 형상비(L/h)와 편심거리(E)의 영향으로 인하여 보통손상 수준에서 심각한 손상수준 정도 까지로 변화되고 있음을 알 수 있다. 그리고 구조물의 형상비(L/h)에 따른 손상수준을 평가하면, 형상비(L/h)가 1.0에서 3.0으로 커질수록 굴착단계에 따른 손상은 보다 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

터널막장 진행시 형상비에 따른 손상수준은 그림 6에 나타난 것과 같이 예측할 수 있는 방향성을 가지고 있으며, 이를 통해 터널 막장진행 단계에 따른 손상수준을 예측하여 굴착에 따른 구조물의 손상발생에 대하여 사전에 평가할 수 있어 문제가 예상되는 경우에 다양한 대책등이 강구될 수 있을 것이다.

3.3.2 각변위와 수평변형율에 의한 구조물 손상

구조물의 형상비(L/h)와 편심거리(E)에 따른 구조물

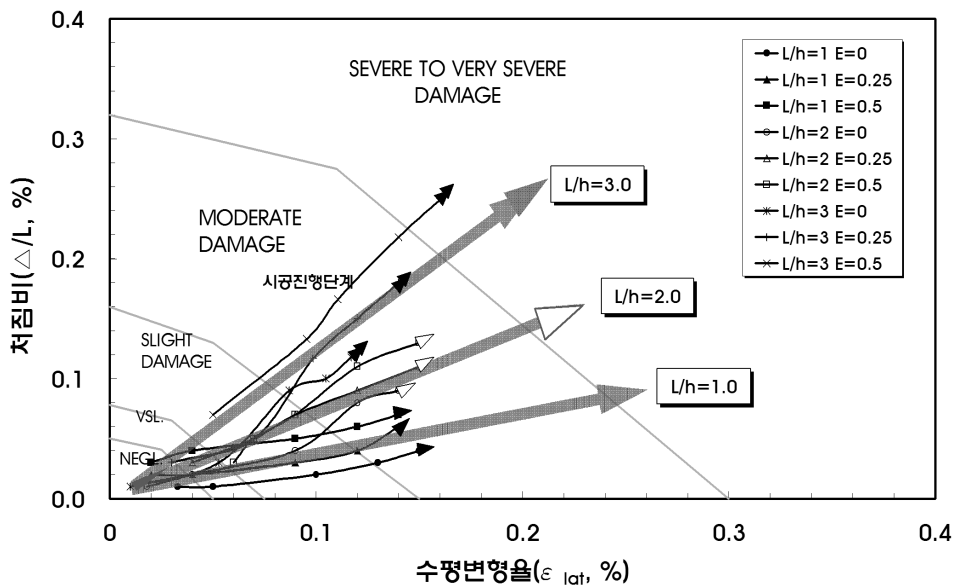


그림 6. 수평변형율과 처짐비에 의한 구조물 손상평가

의 손상거동을 굴착단계에 따라 비교 평가하였으며, 이를 위해 각변위(β)와 수평변형율(ϵ_{lat})의 관계 도표를 통해 분석하였다. 그림 7을 보면, 막장이 진행됨에 따라 구조물의 손상정도는 구조물의 형상비(L/h)와 편심거리(E)의 영향으로 인하여 보통손상수준에서 매우 심각한 수준 정도까지로 변화되고 있음을 알 수 있다. 그리고, 구조물의 형상비에 따른 손상수준을 평가하면, 형상비가 1.0에서 3.0으로 커질수록 굴착단계에 따른 손상수준은 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 터널막장 진행시 형상비에 따른 손상수준은 예측할 수 있는 손상수준은 그림 7에 나타난 것과 같이 예측할 수 있는 방향성을 가지고 있으며, 이를 통해 막장진행 단계에 따른 손상수준을 예측하여 막장진행에 따른 구조물의 손상발생에 대하여 사전에 평가할 수 있어 문제가 예상되는 경우에 다양한 대책등이 강구할 수 있는데 활용될 수 있다. 그리고 굴착진행 단계에 따른 구조물의 거동을 수평변형율과 처짐비에 의한 손상도표와 각변위와 수평변형율에 의한 손상도표로 평가한 것을 비교해보면, 각변위와 수평변형율에 의한 손상도표에 의한 손상수준이 수평변형율과 처짐비에 의한 손상수준에 비해 보다 크게 나타나며, 손상평가지 보다 안전하고 보수적인 평가를 위해서는 각

변위와 수평변형율에 의한 평가도표가 주로 활용되어야 할 것이다.

3.3.3 균열크기가 고려된 구조물의 손상평가

손상도표에 의한 구조물의 손상수준 평가시 보수적이고 안전측으로 구조물을 평가하기 위해서는 각변위와 수평변형율 관계도표가 주로 활용되어야 할 것으로 판단되었다. 그리고 본 손상도표에서 막장진행 단계에 따라 구조물에 발생된 균열에 의한 손상수준을 그림 8에 표시하여 평가해 보았다. 그림 8을 보면, 형상비가 3.0 이상인 구조물에서 각변위와 수평변형율 도표에서는 보통손상 수준으로 평가된 경우가 균열에 의한 평가시 심각한 수준으로 평가되었으며, 또한 약간손상 수준으로 평가된 경우가 균열에 의한 평가시 보통손상 수준으로 평가되었다. 이와같은 결과로 각변위와 수평변형율의 손상도표에 의한 평가시 균열에 의한 평가가 포함된 손상수준 평가가 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.

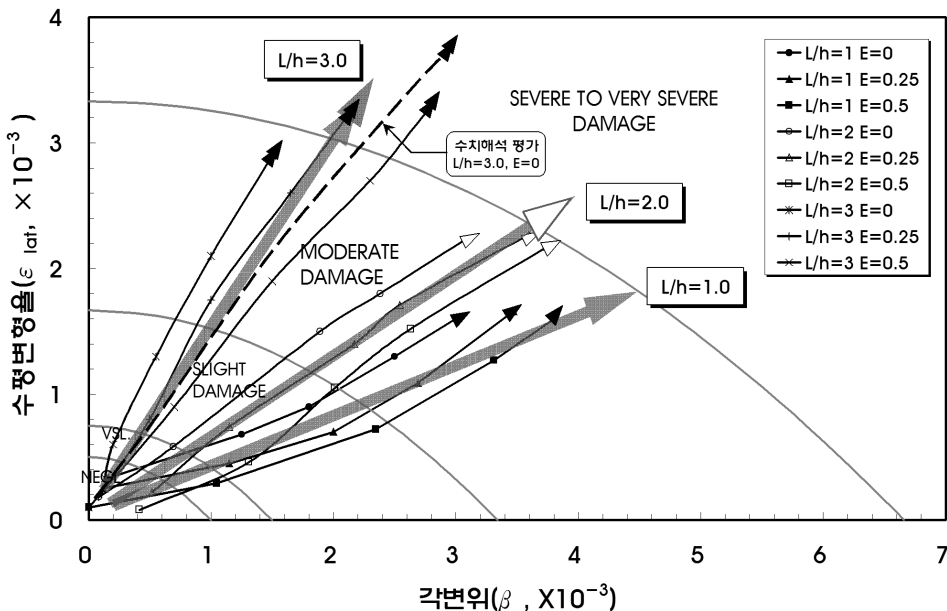


그림 7. 각변위와 수평변형율에 의한 구조물 손상평가

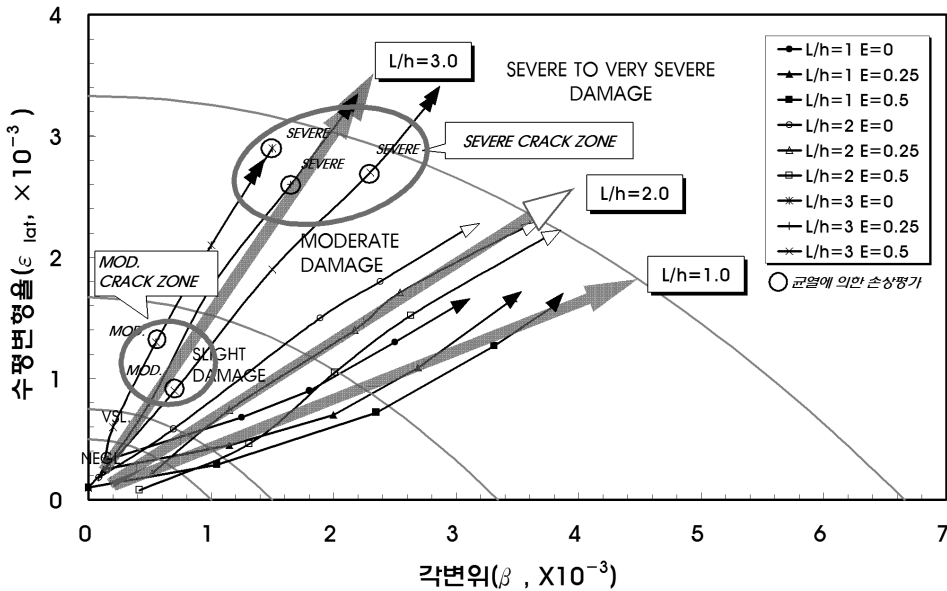


그림 8. 균열크기가 고려된 구조물 손상평가

4. 결 론

도심지에서 터널굴착에 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. 터널굴착에 따른 인접구조물의 손상수준 평가시에는 터널막장 진행위치(X/D), 구조물의 형상비(L/h), 편심거리(E), 교차각(SA)에 따라 구조물의 손상수준은 현저히 다르게 나타나는 것을 확인하였으며, 특히 구조물의 sagging과 hogging 영역을 구분하여 보다 세밀하고 구체적인 평가가 이루어 져야 할 것이다.
2. 터널막장 진행에 따른 구조물의 편심거리(E)와 교차각(SA)이 고려된 처짐비에 의한 정규화 각변위($\beta(\Delta L)$)를 통하여 예측된 구조물의 각변위로 구조물의 처짐비를 산정할 수 있는 관계식(식 (1)~(6))을 제안하였다. 제안된 관계식은 터널막장 진

행에 따른 각변위로 구조물의 처짐비 산정이 가능하며, 시공중 발생가능한 손상수준을 평가함으로써 인접구조물의 손상 발생전의 보완대책의 여부를 평가하는데 활용될 수 있다.

3. 구조물의 형상비(L/h), 시공진행단계, 이격거리(X), 편심거리(E) 변화에 따라 손상수준이 추적 가능한 수평변형률(ϵ_x)과 처짐비(ΔL), 각변위(β)와 수평변형률(ϵ_x) 손상도표를 제안하였으며, 구조물의 형상비에 따른 굴착 시공단계별 손상수준을 예측할 수 있는 방향성을 확인할 수 있었다. 그리고, 굴착 진행 단계에 따른 구조물의 손상 거동 평가시 인접 구조물이 밀집된 도심지 굴착에서는 보다 안전하고 보수적인 평가가 나타나는 각변위와 수평변형률에 의한 손상도표를 활용하는 것이 보다 안전할 것으로 판단된다.
4. 모형실험시 구조물에 발생한 균열의 손상수준을 손상도표에서 평가해 본 결과, 균열손상 수준이 적용된 평가가 각변위와 수평변형률만 적용된 손상수준보다 안전측으로 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 각변위와 수평변형률 뿐만 아니라 균열이 고려된 손상평가를 수행하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김창용 (1999), “도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성예측과 인접구조물 손상평가에 관한 연구”, 박사학위 논문, 한양대학교 대학원.
2. 손무락 (2003), “터널굴착에 따른 지반거동이 인접구조물에 미치는 영향 및 손상도 평가”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 4682-4687.
3. 유충식, 윤효석, 박영진 (2000), “터널굴착에 의한 인접건물의 손상평가”, 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), pp. 41-44.
4. Attewell, P. B., Woodman, J. P. (1982), “Prediction the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil”, Ground Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 13-22.
5. 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, 1~3.
6. Boone, S. J. (1996), “Ground movement related building damage”, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 11, pp. 886-896.
7. Boscardin, M. D., Cording, E. J. (1989), “Building response to excavation-Induced settlement”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 1-21.
8. Burland, J. B., Wroth, C. P. (1974), “Settlement of buildings and associated damage”, Proceedings of Conference on Settlement of Structures, Cambridge, pp. 611-654.
9. Potts, D. M., Addenbrooke T. I. (1997), “A structure’s influence on tunnelling induced ground movements”, Proc. Int. Civ. Eng. Getech. Eng., pp. 109-125.
10. 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.
11. Schmidt, B. (1969), “Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil”, Ph.D. Thesis, University of Illinois.



황 의 석

대림산업(주)
기술연구소
대리

E-mail: hwangysuk@empal.com



김 학 문

단국대학교
토목환경공학과
교수

E-mail: khm1028@dankook.ac.kr