

지반 굴착에 따른 인접 프레임구조물의 손상평가에 관한 모형실험 연구 Model Test for the Damage Assessment of Adjacent Frame Structures in Urban Excavation

김성철¹⁾, Seong-Cheol Kim, 황의석²⁾, Eui-Seok Hwang, 김주철³⁾, Zu-Cheol Kim, 김학문⁴⁾, Hak-Moon Kim

¹⁾ (주)삼보기술단 지반공학부 사원, Staff, SAMBO Engineering Co., LTD

²⁾ 단국대학교 토목공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

³⁾ 삼성물산(주) 제2연육교 과장, 공학박사, Ph.D., Manager, 2nd Bridge Project, Samsung Corporation

⁴⁾ 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

SYNOPSIS : In this study, Model test of concrete frame structures with various shapes and locations are carried out by means of applying Peck's(1969) settlement method.

The results of the model test indicated that important correlations existed between the behavior of frame structure and ground movement. Also, the damage level of frame structure closely influenced by the phase of excavation. Therefore, prediction of damage level at early phase of construction should be very precise. The damage level graph by Cording et al.(2001), the angular distortion provided gradually more serious damage to frame structures for the all cases. But the damage level graph by Burland(1997), was difficult to confirm because of very small amount of deflection ratio.

Key words : angular distortion, lateral strain, deflection ratio, damage assessment

1. 서 론

도심지에서 흙막이 굴착시 주변 지반의 침하, 인접건물의 균열이나 붕괴, 지하 매설물 등의 손상평가는 최근 지반굴착시 대두되고 있는 중요 연구대상이다. 따라서, 근접시공시 해당 구조물 자체를 안전하게 시공하여야 함은 물론 인접구조물의 안정성을 확보하고 이를 입증하기 위한 기초적인 실험연구의 중요성을 충분히 인지하여야 한다.

흙막이 굴착시 지반거동에 따른 인접구조물의 손상평가는 주로 수치해석을 통한 방법이나 현장계측 자료 및 모형실험으로 연구가 이루어지고 있으나, 보다 정확한 구조물의 거동 손상평가를 위해서는 건물의 형상, 위치, 굴착단계 등을 변화시킨 다양한 조건에서의 실험 결과를 토대로 구조물 손상수준의 사전 예측 및 대책 마련 등을 총괄하는 다각적인 검토와 연구가 선행되어야 할 것이다.

그러므로 본 연구에서는 흙막이 굴착시 지반거동에 의한 구조물의 거동을 평가 분석하기 위하여 Peck(1969)이 경험적으로 추정하여 제안한 인접 지반침하량과 영향거리 등을 콘크리트 프레임구조물(open frame)에 적용하였다. 또한, 구조물의 크기와 이격거리를 변화시킨 조건으로 굴착단계별 지반거동에 따른 모형구조물의 거동을 관찰하였고, 배면거리에 따른 구조물의 수직 및 수평변위 결과를 토대로 인접 프레임구조물의 거동 및 손상수준을 평가하였다.

2. 모형실험

2.1 모형실험 개요

모형실험을 위한 모델은 그림 1과 같이 사질토 지반에서의 H-PILE+ 토류관 흠막이공법으로 최종 18m의 굴착깊이, 2층의 프레임구조물로 가정하였다. 지반 거동에 따라 발생하는 인접 프레임구조물의 손상영향을 평가하기 위해서 Peck(1969)의 경험적인 방법에 따른 지반 침하량을 적용하였으며, 표 1과 같이 구조물의 형상비(L/h)와 이격거리(X)의 변화에 따른 총 7개 조건들에 대해 모형실험을 수행하였다.

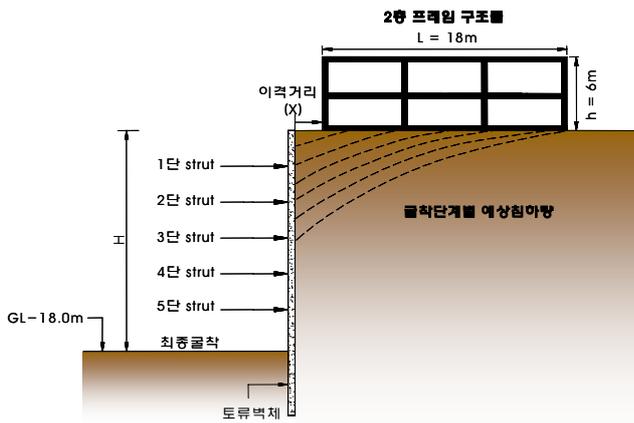


그림 1. 모형실험에 적용된 가정단면

표 1. 모형실험 개요

지반조건	형상비 (L/h)	구조물의 이격거리(X)	비 고
사질토 지 반	1.0	0H	EF-1
		0.2H	EF-2
		0.4H	EF-3
		0.6H	EF-4
	2.0	0H	EF-5
		0.2H	EF-6
	3.0	0H	EF-7

H: 굴착깊이, h: 구조물의 높이, L: 구조물의 수평길이

모형실험에 사용된 프레임 벽체의 제작은 일반적인 콘크리트 재료로 이루어진 실제 구조물 벽체의 단위중량과 강도를 고려하여 1/10 크기로 축소하였으며, 재료의 물성치는 시멘트 모르타르 압축강도 시험 방법(KS L 5105)을 사용하여 선정하였으며, 선정된 모형 구조물 재료의 배합비는 시멘트, 모래, 물의 배합비 1:3:0.6으로 모형 구조물 벽체를 제작하였다.

표 2. 모형벽체에 적용된 치수 및 물성치

Properties	Prototype	Model
단면적 (cm ²)	40cm × 40cm	4cm × 4cm
단위중량 (tf/m ³)	2.50	2.07
탄성계수 (tf/m ²)	2.2 × 10 ⁶	2.3 × 10 ⁵

2.2 모형실험 장치 및 실험방법

Peck(1969)에 의해 제안된 침하량을 모형벽체 하부에 유발시킬 수 있도록 그림 2와 같이 길이 2m인 H-beam위에 15cm 간격으로 총 13개의 스크류 잭(Screw jack)을 설치하였다. 또한, 각 스크류 잭의 위치에 디지털 변위측정기(정밀도:0.001mm)를 설치하여 원하는 침하량을 정확하게 적용시킬 수 있도록 하였다. 그리고 모형벽체의 거동을 측정하기 위해 사진 계측을 이용하였으며, 균열의 크기와 변화를 확인하기 위해 균열경을 사용하였다.

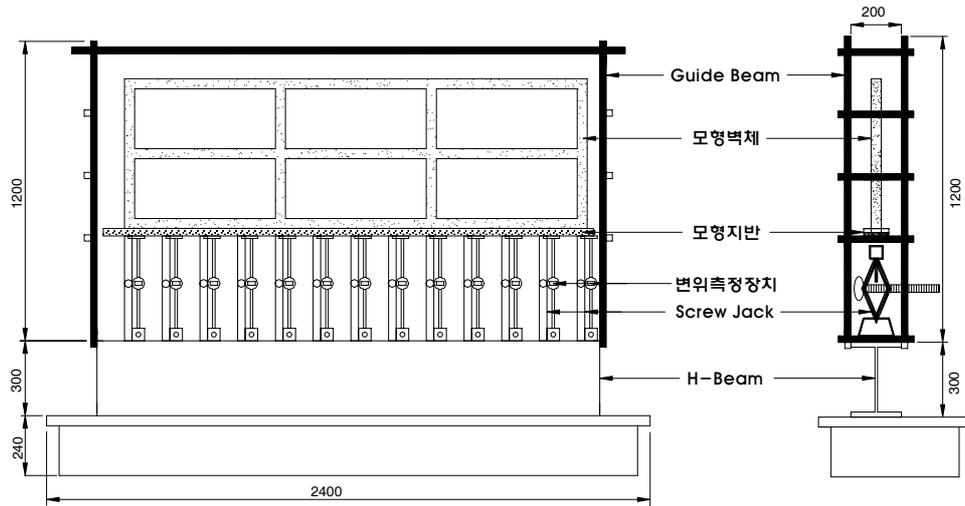


그림 2. 모형벽체 침하유발 장치도

모형 프레임구조물은 시멘트 모르타르를 사용하여 시험 시작에서 종료까지 배합비, 단위중량, 양생기간을 일정하게 하여 구조물의 강도에 변화가 없도록 하여 제작하였으며, 실제 건물 벽체를 1/10의 크기로 축소하여 모형화하였다. 침하량은 총 18m 굴착시 단계별 굴착깊이를 3m씩으로 총 6단계 굴착하였을 경우 배면에 발생하는 침하량을 적용하였다.

굴착단계별 모형벽체의 거동 변화를 측정하기 위하여 벽체에 일정 간격으로 포인트를 부착한 후 사진촬영을하였으며, 촬영된 사진은 AutoCAD를 이용하여 굴착단계별 벽체에 부착된 포인트의 좌표값을 분석하여 지반과 구조물의 상호 거동특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 구조물의 형상에 따른 거동 평가

그림 3은 형상비(L/h)가 3인 구조물의 경우, 굴착 단계별 지반 및 구조물의 수평변위와 수직변위를 나타낸 결과이다. 지반거동에 따른 구조물의 손상영향이 가장 큰 BAY-1 구간에서 지반 및 구조물의 수직변위를 굴착단계별로 살펴보면 0.17H 굴착시 구조물의 수직변위가 지반의 수직변위에 비해 40%~100%, 0.67H 굴착시 1.7%~21.5%, 1.0H 굴착시 0.8%~4.4% 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이처럼 굴착이 진행됨에 따라 지반침하량이 증가하면서 BAY-1 구간의 구조물 수직변위가 점차적으로 지반의 변위거동과 유사한 형태로 발생하는 경향을 보이고 있는데, 이는 구조물이 균열 등에 의한 누적 손상으로 인해 점차적으로 강성이 저하되는 것을 의미하며, 굴착면으로부터 거리가 멀어질수록 구조물 자체에 강성이 발휘되고 지반과의 마찰에 의한 영향 또한 크게 발휘되고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4는 흙막이 굴착시 각 형상별 구조물의 BAY-1에서 발생하는 지반경사 차이로 정규화된 각변위($\beta/\Delta GS$)를 굴착단계별로 나타내고 있다. 그림 4에서 나타나는 바와 같이 구조물의 형상비(L/h)에 관계 없이 굴착깊이가 증가할수록 구조물의 정규화 각변위($\beta/\Delta GS$)는 0.06~1.59 범위로 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 형상비(L/h)가 클수록 구조물의 정규화 각변위($\beta/\Delta GS$)가 크게 나타나고 있다. 또한, 굴착깊이가 0.67H에서 0.83H로 진행되는 지점에서 비교적 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 굴착단계별 구조물의 손상평가지 구조물 거동에 의한 평가가 추가적으로 이루어져야 하며, 지반거동으로 정규화된 구조물의 각변위($\beta/\Delta GS$)에 대한 평가가 요구되는 것을 알 수 있다.

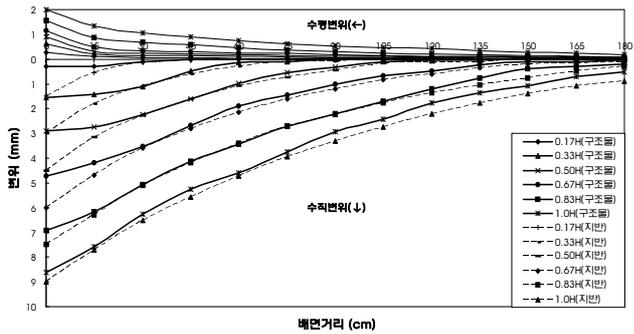


그림 3. 지반 및 구조물의 수평·수직변위

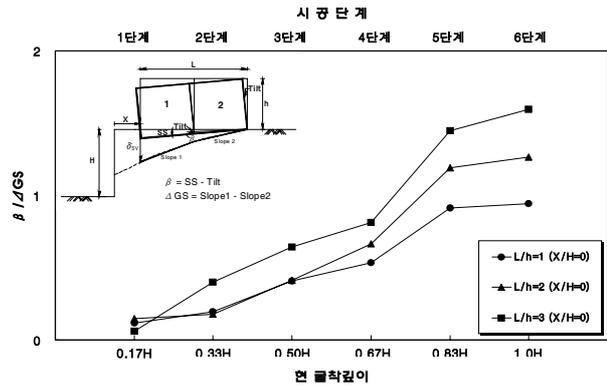


그림 4. 굴착 단계별 정규화 각변위의 변화

3.2 구조물의 이격거리에 따른 거동 평가

그림 5는 구조물의 형상비(L/h) 및 이격거리에 따른 구조물의 최대 주 변형율(ϵ_p)을 굴착단계별로 나타낸 결과이다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 흙막이 굴착이 진행됨에 따라 지반의 침하가 증가하면서 이에 대한 영향으로 각 이격거리별 구조물의 최대 주 변형율(ϵ_p) 또한 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 동일한 형상비(L/h)를 가진 구조물에서 굴착면과 멀리 이격될수록 최대 주 변형율(ϵ_p)은 보다 완만한 경사를 나타내고 있다.

그림 5에서 Cording et al.(2001)이 제안한 최대 주 변형율(ϵ_p)을 평가기준으로 하여 살펴보면, 형상비(L/h)가 1인 이격거리 0H 구조물의 경우 굴착깊이 0.50H일 때, 이격거리 0.4H인 경우는 굴착깊이 1.0H의 시점부터 구조물의 손상은 약간손상수준(Slight Damage)으로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 굴착단계별 최대 주 변형율(ϵ_p)에 의한 구조물의 손상평가시 이격거리에 따라 손상영향이 발생하는 굴착시점에서 주의깊은 평가가 요구되는 것을 의미하며, 보다 정밀한 구조물 손상평가를 위하여 각 형상비에 따른 구조물 평가뿐만 아니라 이격거리에 따른 평가가 함께 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

또한, 그림 5에서 형상비(L/h)가 1인 이격거리 0.6H인 구조물의 경우는 구조물의 손상영향이 매우 미세한 범위임을 알 수 있지만, 구조물에 영향을 미치는 다른 손상인자와의 상호관계를 고려하여 평가하는 것이 바람직할 것이다.

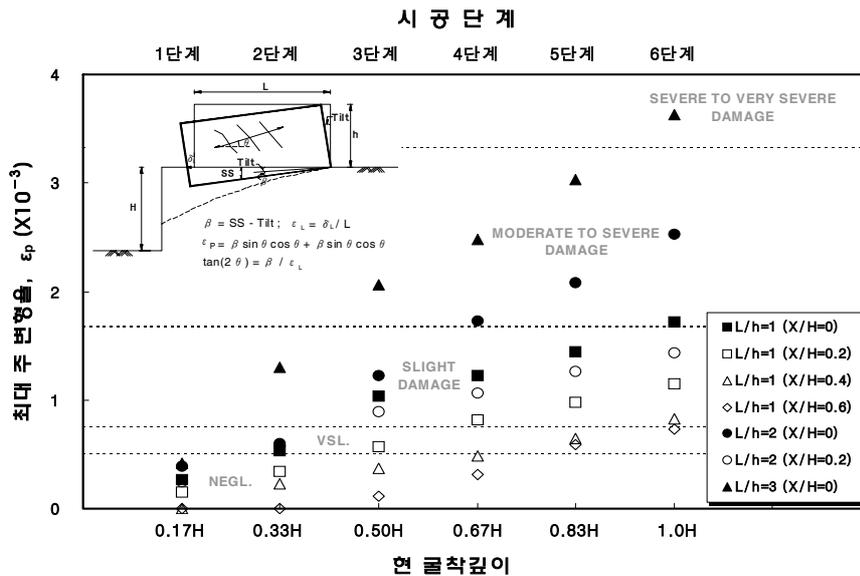


그림 5. 굴착 단계별 최대 주 변형율의 변화

3.3 인접 구조물의 손상평가

그림 6은 Cording et al.(2001)이 제안한 각변위와 수평변형율의 손상관계도표를 이용하여 굴착단계별 구조물의 형상비와 이격거리에 따라 발생하는 구조물의 손상영향을 나타낸 결과이며, 그림 7은 Burland(1997)가 제안한 수평변형율과 처짐비에 따른 손상범주 관계도표를 이용하여 나타낸 결과이다.

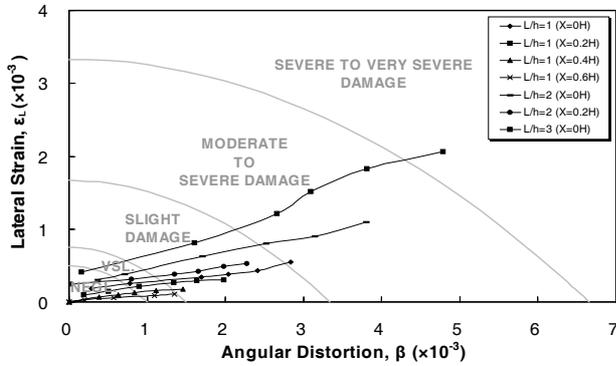


그림 6. 각변위와 수평변형율에 의한 손상평가

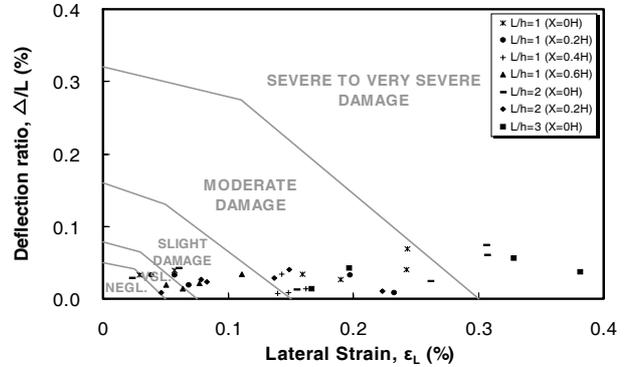


그림 7. 수평변형율과 처짐비에 의한 손상평가

위의 그림 6에서 나타난 바와 같이 흙막이 굴착이 진행되면서 각 구조물의 손상수준은 형상비와 이격거리의 영향으로 인해 무시수준에서 매우심각한 손상수준으로 까지 다양하게 변화되고 있으며, 형상비가 커질수록 구조물의 손상수준은 상대적으로 크게 나타나고 특히, 굴착이 진행됨에 따라 각변위에 의한 변화가 크게 일어나 구조물의 손상에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

그림 7에서는 구조물의 형상비가 커질수록, 굴착면과의 이격거리가 가까울수록 구조물에 대한 손상영향은 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 굴착이 진행됨에 따라서는 구조물의 손상영향이 수평변형율의 변화에 좌우되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 흙막이 굴착시 굴착이 진행됨에 따라 균질한 사질토 지반에서 발생하는 지반침하량을 구조물 하부지반에 적용한 제한된 조건의 모형실험을 통하여 구조물의 형상과 이격거리의 변화에 따른 인접 프레임구조물의 손상 거동을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 최종 굴착시(1.0H) 발생하는 지반거동에 의한 프레임구조물의 수직변위는 BAY-1에서 지반의 수직변위에 비해 1~7% 작게 발생하고 BAY-2, 3에서는 2~42% 작게 발생하는 것으로 보아 구조물의 거동은 지반의 거동과 밀접한 상관성을 가지면서 반응하고 있으며, 구조물의 배면거리가 멀어질수록 구조물 자체의 강성, 지반과의 마찰에 의한 영향이 크게 발휘되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 구조물 손상평가지 형상비(L/h)에 따라 비교하여 보다 정밀한 구조물 손상평가가 이루어져야 함을 알 수 있었다.
- (2) 흙막이 굴착단계에 따른 구조물의 정규화 각변위($\beta/\Delta GS$)는 0.06~1.59의 범위로 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 형상비(L/h)가 클수록 구조물의 정규화 각변위가 크게 나타나고, 굴착깊이 0.67H에서 0.83H으로 진행되는 지점에서 비교적 큰 폭으로 증가하는 것으로 보아 굴착단계별 구조물의 손상평가지 지반 및 구조물의 상호거동 분석을 위해 지반거동으로 정규화된 구조물의 각변위($\beta/\Delta GS$)를 고려하여 평가하는 것이 바람직할 것이다.

- (3) 단계별 굴착에 따른 이격거리별 프레임구조물의 최대 주 변형율(ϵ_p)은 굴착이 진행됨에 따라 선형적으로 증가하는 경향이 나타나는데, 이는 탄성영역 내에서의 거동으로 판단된다. 또한, 형상비(L/h)와 이격거리(X)에 따라 구조물의 손상영향이 발생하는 굴착단계가 다르게 나타나는 것으로 보아 구조물 손상평가지 형상비와 이격거리를 고려하여 구조물의 손상영향이 발생하는 굴착시점에서 보다 정밀하고 구체적인 평가가 이루어져야 함을 확인할 수 있었다.
- (4) 각변위와 수평변형율에 의한 구조물 손상평가지 굴착이 진행됨에 따라 형상비(L/h)가 1인 구조물의 경우 무시에서 보통 손상수준으로 나타나고, 형상비(L/h)가 3인 구조물의 경우 무시에서 매우심각한 손상수준으로 나타나고 있는 것으로 보아 형상비(L/h)가 커질수록 굴착이 진행됨에 따라 각변위의 영향이 크게 발생하여 구조물의 손상수준이 상대적으로 크게 나타나며, 굴착면으로부터 멀리 이격될수록 구조물에 미치는 손상영향이 현저하게 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 수평변형율과 처짐비에 의한 구조물 손상평가지 굴착이 진행됨에 따라 구조물의 형상비(L/h)가 커질수록, 굴착면과의 이격거리가 가까울수록 구조물에 대한 손상영향은 크게 발생하며, 굴착단계별 구조물의 손상영향은 처짐비보다 수평변형율의 변화에 의한 영향이 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김학문 (1997), “도심지 지반굴착에서 인접건물의 손상영향과 보호”, 대한 토목학회 논문집.
2. 유충식 (2002), “도심지 깊은 굴착시 주변 건물 및 매설관 손상평가”, 대한토목학회 학술발표회논문집(Ⅱ).
3. Burland, J. B. and Wroth, C. P. (1974), "Settlement of buildings and associated damage", Proceedings of a Conference on Settlement of Structures, Pentech Press, London, England, pp. 611-654.
4. Cording, E. J. and Long, J. H., Son, M., Laefer, D. F. (2001), "Modelling and analysis of excavation-induced building distortion and damage using a strain-based damage criterion", London Conference for Responses of Buildings to Excavation-Induced Ground Movements in London.
5. Laefer, D. F. (2001), "Prediction and assessment of ground movement and building damage induced by adjacent excavation", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
6. O'Rourke, T. D. Cording, E. J. and Boscardin, M. (1976), "The ground movement related to braced excavation and their influence on adjacent structure", Univ. of Illinois Report for U.S. Dept. of Transportain, Report No. DOT-TST-76T-22.
7. Peck, R. B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", Proc. 7th Int'l Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr., Mexico City, State of the Art, pp. 225-290.
8. Son, M. (2003), "The Response of buildings to excavation-induced ground movements", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.