

선행하중 적용시 흙막이 벽체 및 주변지반의 거동에 관한 굴착모형실험

An Experimental Investigation for the Effects of Pre-loading on the Ground Movement in Sand

이 봉 열*1 Lee, Bong-Yeol

김 학 문*2 Kim, Hak-Moon

Abstract

Urban excavation requires highly reliable prediction technique for the design and construction of earth retaining structure in order to protect adjacent structures around deep excavation. Application of the pre-loading of bracing for deep excavation has been reported, and the known beneficial effects are not fully understood and recognized by many practitioners. Model tests have been carried out to evaluate the efficiency of pre-loading system in reducing ground settlement as well as prediction of structural damage around excavation in sand. The test results revealed that the applied pre-loading of 50% and 70% showed about 20% of reduction in horizontal wall displacement and 30~40% reduction in ground settlement. Also, bracing forces and earth pressure distribution behind the wall have been monitored during pre-loading at various excavation stages.

요 지

도심지에서 깊은 굴착 및 근접굴착과 관련하여 흙막이 구조물의 설계와 시공에 있어서 주변지반 및 인접구조물의 안전성 확보를 위하여 신뢰할 만한 예측기술이 요구되고 있다. 깊은 굴착 및 근접굴착에서 흙막이 구조물의 지지체에 대한 사전재하의 적용이 연구되었고, 경제적인 효과가 있음은 알려져 왔으나 많은 연구자들에 의하여 완전히 이해되거나 인정될 만한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 흙막이 벽체의 수평변위를 억제하여 지반침하를 감소시키는 사전재하 적용의 효과에 대하여 연구를 수행하였고, 사질토지반에서 굴착주변지반의 변위 및 구조물의 손상을 예측하는 모형실험을 수행하였다. 본 연구의 수행결과는 사전재하하중 50%, 70%를 적용하였을 때, 20%의 벽체수평변위가 감소하였고, 지반침하 및 지중변위는 30%내지 40% 감소하였다. 또한 각 단계별 굴착시 사전재하하중에 따른 심도별 지중침하율 및 벽체에 작용하는 토압분포를 제시하였다.

Keywords : Deep excavations, Earth pressure distribution, Ground settlement, Horizontal wall displacement, Model test, Pre-loading

1. 서 론

도심지 대규모, 대심도 근접굴착은 굴착현장 흙막이 구조물 및 인접지반에 변위를 발생시키며, 이로 인하여 인접 구조물과 흙막이 구조물 자체의 안정성에 영향

을 미치게 된다.

따라서 굴착심도가 깊어지는 경우 흙막이벽체 근접 부 조건, 벽체강성, 버팀시스템의 강성, 선행하중과 같은 영향요소들은 전체 흙막이구조물의 안정성 확보에 매우 중요할 뿐 아니라 주변지반 및 인접구조물의 안

*1 정회원, 시지이엔씨(주)부설기술연구소장 (Member, C.G. Engrg. & Consulting Co. Ltd., R&D Group PM, Managing Director, tojo@unitel.co.kr)

*2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ.)

정성 확보에도 매우 중요하다.

일반적으로 흙막이 구조물은 굴착에 의해서 발생하는 토압에 저항하도록 하면서 지반거동을 최소화하기 위하여 지보재를 설치하지만 굴착이 진행됨에 따라 흙막이 벽체 및 버팀지지체에 변형이 발생되고 이로 인하여 주변지반이 침하하게 되며, 지반침하량이 지반의 탄성한계를 넘어서면 지반붕괴에 의한 인접구조물의 손상과 붕괴를 유발시키게 된다.

깊은 굴착에 있어서 지지구조체에 적용하는 선행하중은 사질토나 중간부터 단단한 점토에 이르기까지 다양한 토질조건에서 연성의 강널말뚝과 강성의 지중연속벽과 같은 상대적으로 강성이 큰 벽체를 이용하면 굴착하면 지반의 침하를 감소시키는데 유용하다.

선행하중에 의한 흙막이 벽체에 작용하는 토압에 대한 연구는 벽체에 선행하중을 재하하므로써 흙막이 벽체의 거동 및 주변지반의 거동을 최소화하고자 하는 의도에서 연구되기 시작하였으며, 최초로 Palmer와 Kenny(1972)는 Oslo 지하철 현장에서 버팀대에 선행하중을 가하지 않은 상태에서 실측한 버팀대의 강성이 이상적인 탄성상태의 강성에 2%~4% 정도의 범위에 속하는 것으로 보고하였다. 즉, 굴착의 진행에 따라 측압을 받게 되면 부재들 간의 연결부 틈새가 폐합되고 최종적으로 버팀대의 강성이 이상적인 탄성강성과 같아진다.

Clough(1975)는 지지구조물의 거동을 줄이는 데에 있어서 선행하중의 최적영향은 Terzaghi와 Peck(1967)에 의해 제안된 것들보다 약간 더 큰 값을 적용함으로써 얻을 수 있다고 그림 1과 같이 제시하였다.

O'Rourke(1976)는 선행하중에 의하여 감소되는 지반 침하 효과에 대한 연구에서 설계하중의 50%까지 지지체에 선행하중을 재하하면 지반거동은 억제되는 것으

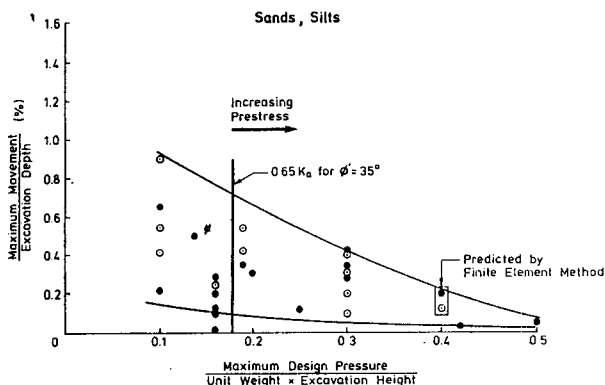


그림 1. 사질토에서의 벽체거동과 선행압력의 관계(Clough, 1975)

로 나타났으며, 구조물에 지지체의 과도한 응력으로 인하여 위대한 영향이 있을 수 있으므로 선행하중은 설계값의 50%까지 제한되어야 한다고 하였다.

Goldberg-Zoino(1976)는 과도한 선행하중의 적용은 예견하지 못한 작업 조건이나 온도 영향으로 인하여 과도한 응력을 유발할 수 있으므로 각 버팀대 설계하중의 약 50% 정도로 선행하중을 가하는 것이 일반적이며, 이러한 선행하중은 흙막이 구조 시스템의 느슨한 부분을 제거함과 동시에 과도한 응력 발생 가능성을 감소시킨다고 하였다.

Mana와 Clough(1981)는 점토지반의 버팀굴착에 대한 유한요소해석에 의해 선행하중을 50%와 100%를 적용하여 그 효과에 대해 연구하였다.

이 연구 결과 선행하중의 적용으로 벽체의 수평변형을 감소시킬 수 있으나 과도한 선행하중을 재하하면 버팀대 위치에서 국부적인 토류구조물의 변형을 발생시키며, 이는 주변지반의 변형을 수반하고 이로 인하여 주변 구조물에 손상을 줄 수 있기 때문에 역효과를 초래할 수 있다고 하였다.

O'Rourke(1981)는 Washington, D.C. 지하철 현장에서 유압잭(Hydraulic jack)을 이용하여 선행하중을 가하는 연구를 수행하였다. 선행하중의 재하는 버팀대에 부착된 재하판(jacking plate)과 띠장 사이에 유압잭을 설치하여 버팀대 설계하중의 50%가 될 때까지 유압을 작용시키는 연구를 수행하였다.

Hunt(1986)는 변위를 제어하기 위해 버팀대가 지지되는 위치에서 띠장의 web 강성 확보에 관한 상세한 시공 계획이 중요하며, 띠장과 토류벽사이의 연결이 주의 깊게 이루어져야 변형과 좌굴을 피할 수 있고 버팀대에는 일반적으로 예상설계하중의 약 50%까지 선행하중을 가하는 것이 일반적이라고 하였다.

Puller(1996)는 깊은 굴착시 선행하중은 강널말뚝, 지하연속벽과 같은 비교적 강성이 큰 흙막이벽 시스템과 사질토, 중간-단단, 단단한 점토층과 같은 지반 조건을 갖는 경우 주변지반의 침하를 감소시키는 데에 유용하다고 하였으며, 선행하중 재하시 흙의 응력-변형을 곡선의 이력현상으로 인한 흙의 강성증대 때문에 변위가 더욱 감소한다고 하였다.

국내에 적용된 사례를 통하여 백(1997)등은 버팀대에 선행하중을 재하하였을 때 선행하중이 없는 경우에 비하여 버팀대의 설치단수를 줄일 수 있었고, 벽체에 발생한 최대수평변위는 굴착깊이의 0.04%~0.13%로 기존

의 버팀대공법을 적용한 현장의 일반적인 수치인 0.2~0.5%보다 상당히 작게 나타났으며, 이는 버팀대 선행하중공법이 흙막이 벽체의 변위를 억제하는 데 매우 효과적이라고 하였다.

최근 국내에서는 근접시공시 인접지반 침하와 벽체 변형을 억제시키는 방법으로 버팀대에 선행하중(Preload)을 재하하여 흙막이 벽체의 변형을 억제한 후 다음 단계 굴착을 행하는 버팀대 선행하중 공법을 적용하고 있다. 이 방법은 버팀대의 탄성압축변형과 부재들 간의 연결부 틈새 등을 굴착전에 폐합시킴으로서 벽체변형이 억제되고 흙막이 벽체에 발생하는 휨응력도 작아지므로 주변지반의 침하를 억제할 수 있다.

이러한 선행하중의 재하에 대한 현장 경험사례들과 수치해석에 의해 도심지 지반 굴착시 선행하중의 적용으로 흙막이 벽체변위 및 지반침하의 억제를 통하여 인접구조물의 피해를 최소화 할 수 있는 것으로 최근 연구되었으나 선행하중의 적용시 효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사질토지반에서 벽체강성, 지반조건, 벽면마찰각의 유,무 등의조건에서 굴착시 버팀대에 선행하중을 재하하므로써 흙막이 벽체의 수평변위 및 주변지반의 침하를 억제하는 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 버팀대에 Peck토압의 0%, 50%, 70%의 선행하중을 작용시켜 선행하중에 대한 총 18가지 모형실험을 수행하였으며, 벽체변위, 지표침하 및 지중변위와 굴착단계에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 토압 및 버팀대에 작용하는 버팀대하중을 측정하여 지반굴착시 선행하중의 적용으로 인한 흙막이 벽체 및 주변지반의 거동에 영향을 미치는 영향요소들에 대하여 규명하고자 하였다.

2. 굴착모형 실험

2.1 개요

실내모형실험은 지반굴착에 있어 흙막이벽체에 작용하는 토압과 지반거동을 파악하고, 지반조건, 벽체강성, 벽마찰, 선행하중 등이 토압과 지반거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하는 것으로 모형실험은 적절한 규모의 지반조건과 벽체강성 뿐만 아니라 토압과 지반거동의 변화를 굴착단계에 따라 관찰할 수 있는 장치가 필요하다.

그리고 기존연구결과에서 알 수 있듯이 흙막이 벽체에 작용하는 토압이나 지반거동에 미치는 영향요소로서 지반조건은 물론이고, 벽체강성, 벽면마찰각, 선행하중 등이므로 본 연구에서는 이들 요소를 변화시키면서 실내 모형실험을 수행하였다.

2.2 실험지반 및 벽체의 물성

본 연구에서는 모형지반의 조성을 위하여 모래를 이용했으며, 실험에 사용된 모래는 일반적으로 모형실험에서 많이 사용되고 있는 주문진 표준사를 이용하였다.

2.2.1 실험지반의 물성실험

본 실험에서 지반을 조성하기 위해 사용된 재료는 공기 건조된 주문진 표준사가 사용되었으며, 물성실험에 의한 결과는 표 1과 같고 입경가적곡선은 그림 2와 같다.

굴착모형 실험시 조성지반의 역학적인 강도정수를 알기 위해 비배수 조건하의 삼축압축 실험을 실시하였으며, 이 결과는 표 2와 같다.

표 1. 실험용시료의 물성치

최대건조밀도(vdmax, g/cm ³)	1.591	D ₆₀ (mm)	0.60
최소건조밀도(vdmin, g/cm ³)	1.283	D ₁₀ (mm)	0.42
최대 간극비	1.042	균등 계수(C _u)	1.429
최소 간극비	0.647	함수 비(w, %)	0.05
비 중(Gs)	2.62		

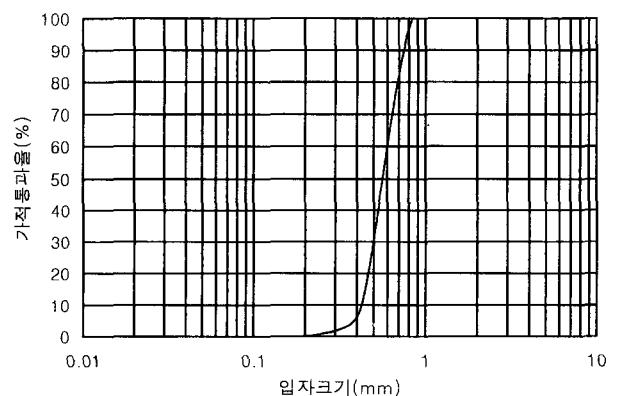


그림 2. 모래시료의 입경가적곡선

표 2. 적용지반의 강도정수

지반 종류	단위중량 (g/cm ³)	내부마찰각 (°)	초기탄성계수 (t/m ²)	상대밀도 (%)	간극비
A 지반	1.43	36	2143	53	0.832
B 지반	1.38	32	976	36.31	0.899

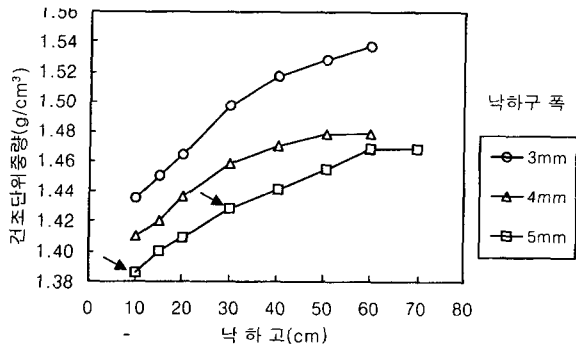


그림 3. 강사높이에 따른 건조단위중량의 변화

표 3. 강사높이에 따른 건조단위중량의 변화

낙 하 고 (cm)	건조단위중량 (g/cm³)	
	강사구폭 5mm	강사구폭 3mm
10	1.382	1.435
20	1.409	1.457
30	1.428	1.497
40	1.448	1.517
50	1.468	1.537

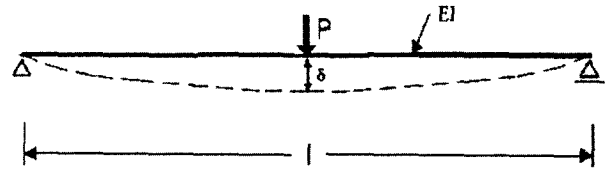
2.2.2 굴착모형실험을 위한 조성지반의 밀도시험

모형실험을 위한 조성지반의 상대밀도 변화에 영향을 미치는 매개변수를 알아보기 위하여 모래 유출구 직경과 낙하고(강사구와 조성지반 사이의 거리)를 조절하는 것으로 하였다.

시험결과는 그림 3에 나타난 바와 같이 각각의 실험 결과로부터 강사량에 따라 상대밀도는 50%~90%의 차이를 보이고 있으며, 일정한 단위중량을 유지하기 위하여 표 3의 단위중량이 조성되는 강사구와 낙하고에 대한 반복실험을 통하여 일정한 밀도로 조성된다는 것을 확인할 수 있었다.

2.2.3 굴착모형 실험 모형벽체의 물성실험

모형벽체의 강성이 지나치게 큰 경우 실험에 있어 상당히 미소한 변위가 발생되므로 매개변수에 따른 지반의 거동특성을 평가하기가 곤란하다. 그러므로 본 실험에서는 강성이 작은 아크릴 벽체를 이용하였으며, 벽체 강성의 변화에 따른 지반거동의 영향을 관찰하기 위하여 아크릴 벽체는 두께가 4mm, 5mm, 7mm인 3종류의 벽체를 사용하였다. 모형벽체의 휨강성을 확인하기 위한 실험은 흙막이벽체로 사용되는 벽체중 두께 7mm를 그림 4와 같이 단순 지지시키고 지점 중앙부에 집중하중을 재하하여 작용하중에 대한 처짐량을 측정하므로 다음 식을 이용하여 산정하였다.



$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \quad EI = \frac{Pl^3}{48\delta}$$

그림 4. 모형벽체의 강성 확인을 위한 실험

표 4. 실험벽체의 제원

두께 (mm)	4	5	7
폭 (cm)	65	65	65
높이 (cm)	90	90	90
탄성계수 (E, t/m²)	2.56×10⁵	2.56×10⁵	2.56×10⁵
단면 2차모멘트 (I, m⁴/m)	5.33×10⁻⁹	10.42×10⁻⁹	2.86×10⁻⁸
휨강성 (EI, t·m²/m)	1.37×10⁻³	2.67×10⁻³	7.32×10⁻³
유연계수 (p, m³/t)	480	250	90

그 결과 모형벽체의 탄성계수는 2.56×10⁵(t/m²)이며, 실험에 사용한 모형벽체는 벽체강성에 따른 토압 및 지반거동을 규명하기 위해 표 4와 같이 다양한 벽체를 사용하였으며, 연성 아크릴로 제작된 벽체의 유연성의 정도를 판단하기 위해 Rowe의 모형실험에서 정의한 유연계수를 사용하였다.

2.3 모형실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 토조, 강사장치, 버팀지지장치, 계측기로 분류될 수 있다.

2.3.1 토조 및 강사장치

모형실험을 위한 모형지반 조성은 일시에 조성될 수 없으며, 일정한 방법으로 조성되어야하므로 균질한 밀도의 지반을 조성하기 위하여 본 연구에서는 모래가 토조의 전폭에 순차적으로 일정한 두께로 뿌려질 수 있도록 강사통과 강사구를 개량하여 그림 5와 같이 제작하였다. 강사통에는 모래 강사구를 두고, 강사구의 폭을 조절할 수 있는 장치를 설치하여 강사폭을 조절할 수 있도록 하였으며, 상대밀도의 재현에 영향이 없도록 표 3 및 그림 3과 같은 강사실험을 통하

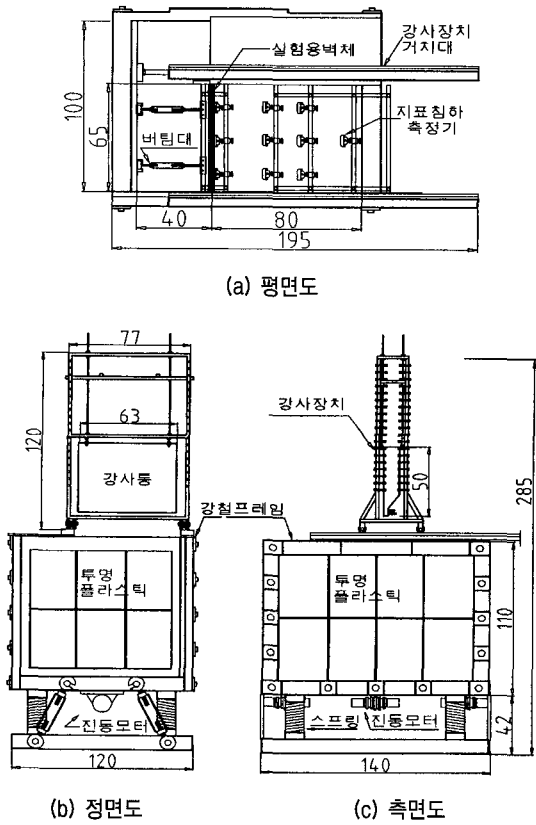


그림 5. 토조 및 강사장치 모형도 (단위: cm)

여 본 연구에서는 강사구의 폭을 5mm, 낙하고 10cm로 하였다.

표 5. 실험시 사용된 계측기기 종류 및 정밀도

계측기기	계측항목	측정개소	측정범위
지표침하측정기 (Digital Gage)	지표침하측정	10개소	0.01 mm ~ 50 mm
토압계 (Pressure Cell)	토압측정	8개소	0.01 kg/cm ² ~ 7.0 kg/cm ²
하중계 (Load Cell)	버팀하중측정	6개소	0.1 kg ~ 125 kg
벽체변위계 (Potential meter)	벽체변위측정	5개소	0.01 mm ~ 50 mm

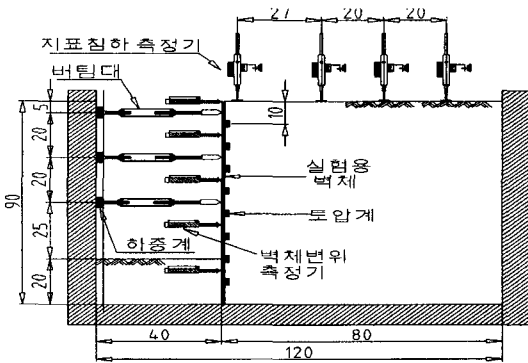


그림 6. 모형실험에 적용된 계측기기의 설치도(단위 : cm)

2.3.2 버팀지지 장치

본 실험에 사용된 버팀지지 장치는 그림 8과 같이 설계되었으며, 버팀지지 장치의 중간부분이 나사식으로 되어있어 길이를 조절할 수 있게 되어 있으며, 버팀대의 끝 부분에는 하중계(Load Cell)를 부착하여 굴착단계별 버팀대에 걸리는 버팀하중을 측정할 수 있도록 하였다.

2.3.3 모형실험 결과 분석을 위한 계측장치

실험시 사용된 계측기기의 종류 및 정밀도는 표 5에 나타내었으며, 실험을 위한 계측기기의 배치도는 그림 6과 같다.

2.3.4 지중변위 측정방법

지반굴착으로 인한 지표침하 및 지반의 지중변위는 인접구조물에 지대한 영향을 미치게 되며, 지중변위의 분석 및 평가는 인접구조물의 손상여부 및 거동평가에 중요한 부분을 차지하게 된다. 따라서 본 연구에서는 토조모형 실험시 그림 7과 같이 지중변위의 측정을 실시하였다.

2.4 선행하중의 영향에 대한 모형실험 방법

본 실험에서는 1단 굴착후 다음단계 굴착 전 버팀대에

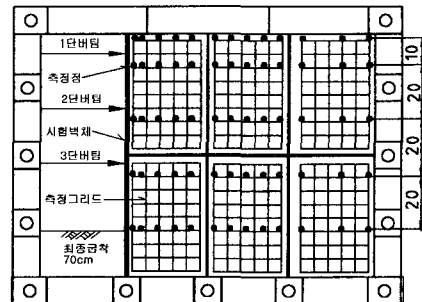


그림 7. 실험토조내의 지중변위 측정방법(단위 : cm)

표 6. 선행하중 크기(단위 : kg)

	Peck 토압	선행하중 50%	선행하중 70%
1단 버팀대	6.2	3.1	4.3
2단 버팀대	13.5	6.8	9.5

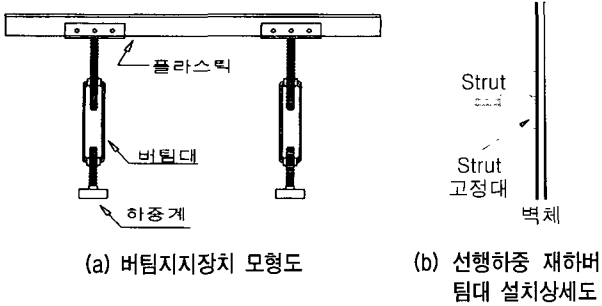


그림 8. 버팀지지장치 모형도

선행하중을 주었다. 사용된 선행하중은 Terzaghi-Peck의 수정토압으로 구한 설계토압의 50%와 70%를 각각 선행하중으로 재하하였다.

버팀대는 지표면으로부터 굴착깊이(H)의 0.1H에 1단 버팀대가 설치되고 0.5H에 2단 버팀대가 설치되었다. 시험시 각 버팀대에는 같은 비율의 선행하중이 적용되었다. 버팀대에 가해진 선행하중의 크기는 다음 표 6과 같다.

본 실험에 사용된 버팀지지장치는 그림 8(a)와 같이 설계되었으며, 보는 바와 같이 중간부분이 나사식으로 되어있어 나사를 회전시켜 길이를 조절하여 선행하중을 재하할 수 있게 되어 있으며, 버팀대의 끝 부분에는 하중계를 부착하여 선행하중 적용시나 시공단계시 버팀대에 걸리는 하중을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 버팀대와 벽체와의 접촉부분에서 버팀대가 상하로 움직이는 것을 방지하기 위하여 그림 8(b)에 나타난 것과 같이 벽체에 버팀대와의 접촉면 상하로 고정지지대를 설치하였다.

실험은 크게 계측기기의 설치, 벽체설치 및 지반조성의 실험 준비단계와 실험 실시단계의 2단계로 나눌 수 있다.

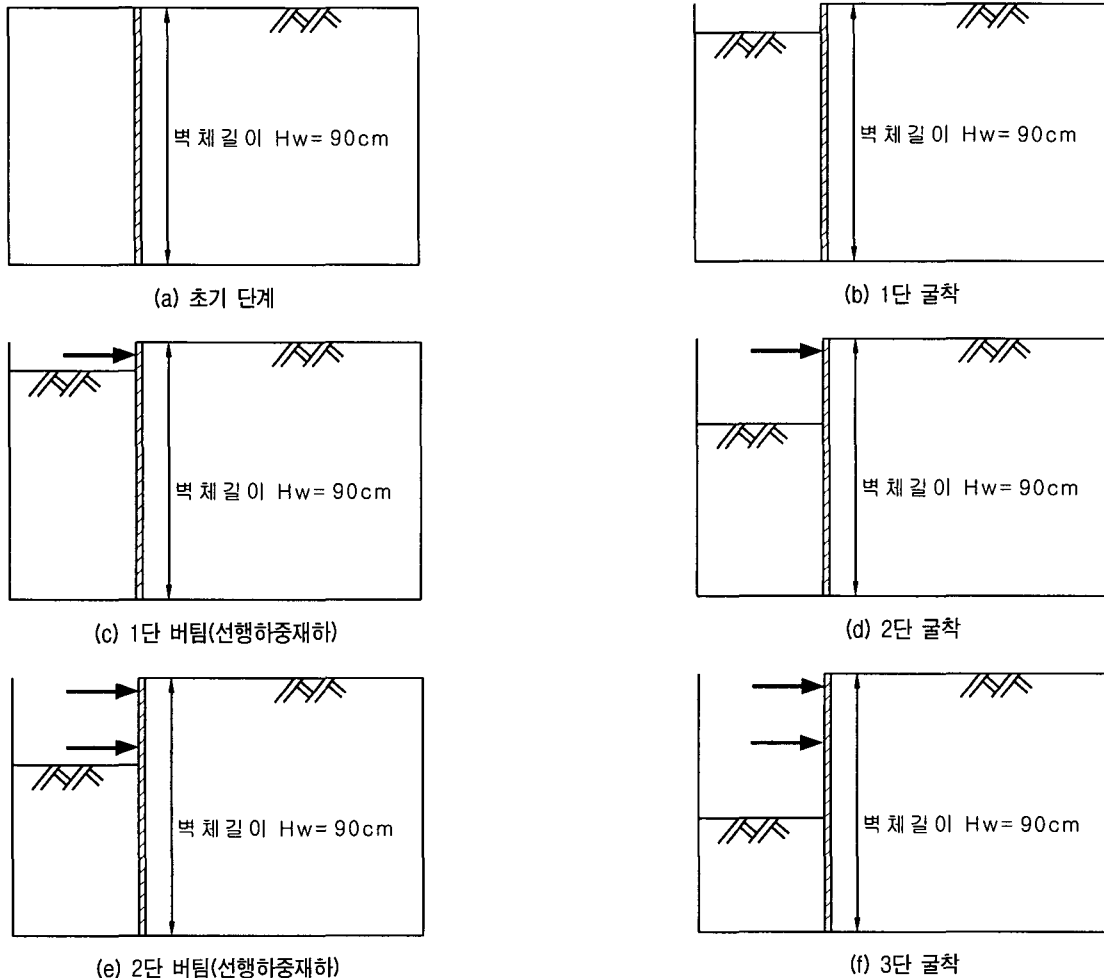


그림 9. 모형 실험 굴착단계도

표 7. 선행하중의 적용에 대한 모형실험 개요

벽체두께	벽마찰 유무	선행하중 조건	분 류
4mm ($\rho=480$)	×	0%	4TN0
		50%	4TN5
		70%	4TN7
	○	0%	4T(F)0
		50%	4T(F)5
		70%	4T(F)7
5mm ($\rho=250$)	×	0%	5TN0
		50%	5TN5
		70%	5TN7
	○	0%	5T(F)0
		50%	5T(F)5
		70%	5T(F)7
7mm ($\rho=90$)	×	0%	7TN0
		50%	7TN5
		70%	7TN7
	○	0%	7T(F)0
		50%	7T(F)5
		70%	7T(F)7

(1) 실험준비 단계

① 계측기기의 설치 ② 실험벽체 설치

③ 실험지반 조성

(2) 실험 실시단계

① 초기 단계(그림 9(a))

② 1단 굴착시행(그림 9(b) : G.L. -10 cm)

③ 1단 버팀대 설치 및 선행하중 도입(그림 9(c) : G.L. -5 cm)

: 버팀대를 벽체의 고정지지대에 거치 후 설계토압(Peck토압)의 50%와 70%로 선행하중을 벽체에

가한다.

④ 2단 굴착 시행 (그림 9(d) : G.L. -30 cm)

⑤ 2단 버팀대 설치 및 선행하중 도입 (그림 9(e) : G.L. -25 cm)

: 버팀대를 벽체의 고정지지대에 거치 후 설계토압(Peck토압)의 50%와 70%로 선행하중을 벽체에 가한다.

⑥ 3단 굴착 시행 (그림 9(f) : G.L. -50 cm)

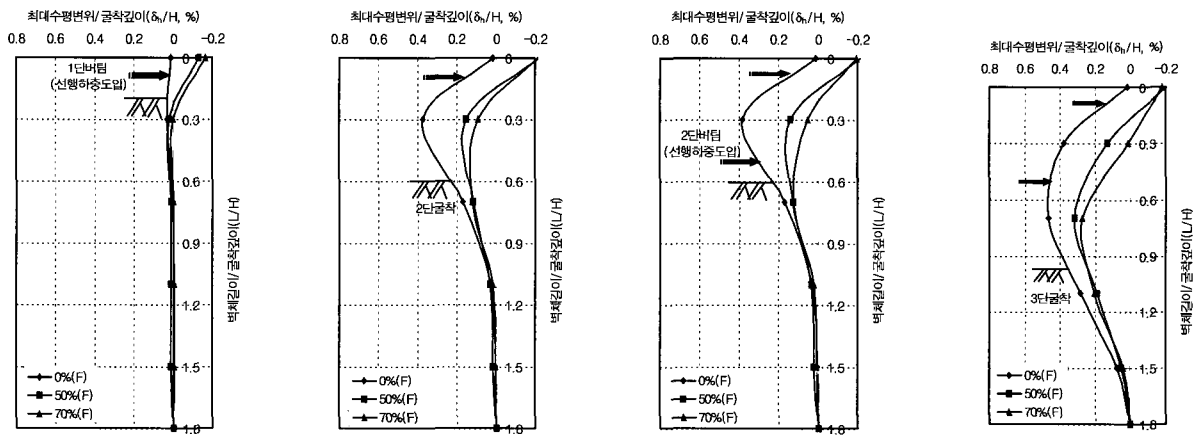
선행하중에 의한 벽체수평변위, 지표침하, 지중변위 및 토압등의 영향을 규명하기 위하여 표 7에 요약한 것과 같이 총 18가지 모형실험을 실시하였다.

3. 선행하중적용에 대한 실험결과 분석

선행하중의 적용에 따른 굴착단계별 벽체의 거동을 고찰하기 위해 벽체두께 7mm, 벽마찰이 있는 경우에 대한 결과를 그림 10에 나타내었다.

1단 굴착시의 벽체변위는 굴착에 있어서 일반적인 켈달레버식 변위형태를 보이며, 그림 10(a)의 1단 버팀의 경우 선행하중이 없는 경우는 1단 굴착과 비교하여 벽체변위의 변화가 없으나 선행하중이 적용된 경우는 선행하중의 영향으로 굴착측으로 발생한 변위가 배면측으로 이동하므로 1단 버팀대의 선행하중을 설계하중의 50%, 70%로 가한 것은 과도한 것을 알 수 있었다.

2단 굴착에 의한 벽체 수평변위 결과는 그림 10(b)와 같고, 벽체 수평변위는 선행하중이 없는 경우가 선행하중이 있는 경우보다 많이 발생하여 1단 버팀대의 선행하중적용으로 2단 굴착시 수평변위 발생을 억제시킴을 알 수 있다.



(a) 1단 버팀 및 선행하중 도입

(b) 2단 굴착

(c) 2단 버팀 및 선행하중 도입

(d) 최종 굴착

그림 10. 굴착단계별 벽체거동

2단 버팀대 설치와 선행하중 적용 후, 최종굴착을 시행하면 선행하중이 없는 경우는 굴착면 상부의 벽체수평변위가 크게 증가하였으나 선행하중이 적용된 경우는 2단 버팀대에 선행하중 적용함으로써 뚜렷한 변위 감소를 나타내지 않았으나 선행하중을 적용하지 않은 경우와 비교하여 억제되는 결과를 얻었다.

3.1 선행하중에 의한 벽체 최대수평변위

그림 11은 최종굴착심도에 대한 최대수평변위의 비를 굴착깊이의 증가에 따라서 비교한 것으로 전체적으로 보면 선행하중이 없는 경우 굴착단계별 최대수평변위의 평균값은 0.87%H이고 선행하중이 50%, 70%인 경우 각각 0.63%H, 0.57%H값을 갖는다.

이러한 결과는 기존의 연구결과와 비교해 보면 Clough & O'Rourke(1990)는 굴착심도에 따른 평균치로서 0.2%H를 제시하였고 국내 현장에서 버팀대 선행하중공법을 사용한 경우 0.04~0.13%H로 나타났으나 모형실험에 의해 얻어진 값은 벽체 강성 및 선행하중에 따라 최소 0.3%H에서 최대 1.5%H까지로 기존의 연구 결과보다는 다소 큰 값을 나타내었다.

표 8은 선행하중 0%를 기준으로 한 최대수평변위 감소량을 나타내었으며, 선행하중이 50%와 70%인 경우에는 각각 17.90%, 22.86% 수평변위의 감소율을 보였다.

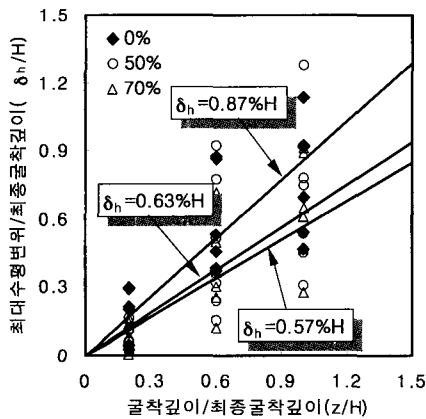


그림 11. 선행하중에 대한 최대수평변위비의 비교

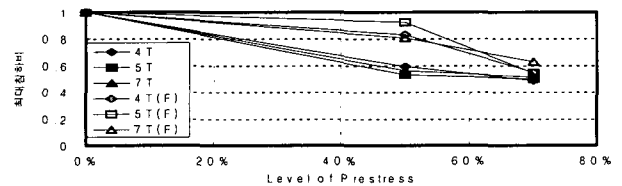
표 8. 선행하중 0%를 기준으로 한 최대수평변위 감소율 (단위 : %)

벽체강성 선행하중	4mm ($p=480$)	5mm ($p=250$)	7mm ($p=90$)	평균
0%	0	0	0	0
50%	8.93	20.02	24.75	17.90
70%	20.42	22.01	26.15	22.86

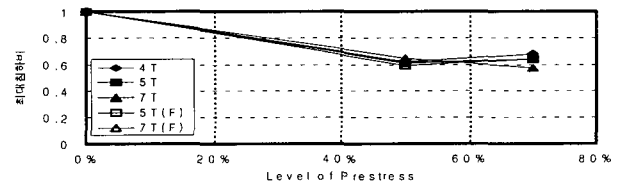
3.2 선행하중에 의한 배면지반 최대지표침하

최종 굴착단계에서의 벽체로부터 거리별 최대침하량을 선행하중 0%를 기준으로 나타내면 그림 12와 같다. Zone 1인 경우를 보면 벽마찰이 있고 선행하중 50%가 적용된 경우 지표침하 억제효과가 별로 크지 않으나 선행하중 70%인 경우는 매우 크게 나타났다. 이는 선행하중의 적용으로 변위가 배면측으로 발생할 때 벽체 부근의 지반이 벽마찰에 의해 구속되기 때문이며, 벽마찰이 없는 경우는 선행하중 50%일 때는 침하 감소 효과는 크나 선행하중 70%일 때는 침하감소 효과가 매우 적게 나타났다.

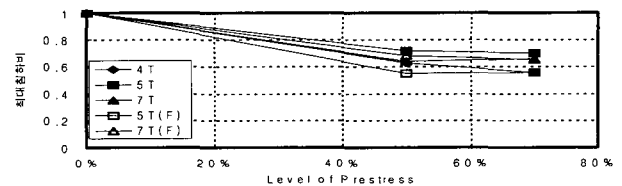
Zone 2, 3에서 보면 벽마찰의 유무에 관계없이 선행하중이 없을 때보다 선행하중이 있을 경우에 침하 감소가 크게 나타나며, 선행하중이 70%인 경우는 50%인 경우에 비해 침하량이 거의 감소되지 않았다. 이러한 결과는 기존의 연구에서 제안한 최적의 선행하중량은 설계



(a) Zone 1 (5~32cm)



(b) Zone 2 (32~52cm)



(c) Zone 3 (52~80cm)

그림 12. 선행하중 적용에 따른 이격거리별 최대지표침하비

표 9. 선행하중 0%를 기준으로 한 최대지표침하 감소율 (단위 : %)

벽체강성 선행하중	4mm ($p=480$)	5mm ($p=250$)	7mm ($p=90$)	평균
0%	0	0	0	0
50%	28.36	29.14	36.39	31.30
70%	48.01	35.28	43.69	42.33

하중의 50%인 것과 일치한다.

표 9는 선행하중 0%를 기준으로 한 최대지표침하 감소량을 나타내며 50%와 70%인 경우에는 각각 31.30%, 42.33% 감소함을 보였다.

3.3 선행하중에 따른 최대수평변위와 최대지표침하의 상관관계

선행하중 적용에 따른 굴착모형실험 결과 벽체 최대 수평변위와 최대지표침하에 대한 상관관계는 그림 13과 같다.

이 결과에서 선행하중을 적용하지 않은 경우는 지표침하가 수평변위보다 1.6배, 선행하중 50%를 적용한 경우는 1.12배 큰 것으로 나타났으며 선행하중 70%를 적용한 경우에는 $1.0\delta_h$ 로 나타났다. 이는 Clough와 Mana (1981)의 $0.5 \sim 1.0\delta_h$ 와 Chang Yu-Ou등(1993)이 제안한 $0.5 \sim 0.7\delta_h$ 보다는 다소 큰 값을 보였다.

그림 14는 Clough(1975)의 수치해석연구에서 선행하중과 벽체변위의 관계를 나타낸 것으로 모형실험결과 7mm벽체와 같이 벽체강성이 큰 경우는 Clough의 연구

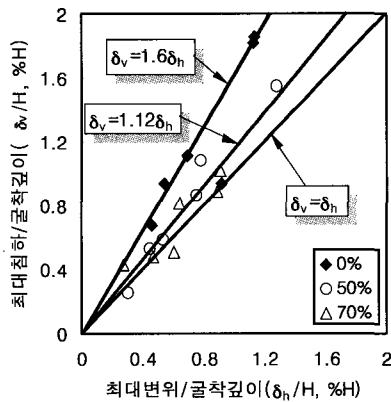


그림 13. 선행하중 적용에 따른 최대수평변위와 최대지표침하 비교

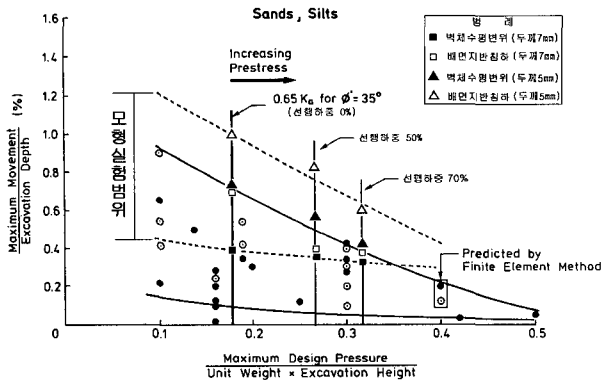


그림 14. 선행하중과 벽체변위의 Clough결과와 모형실험결과 비교

결과와 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

3.4 지중변위에 대한 결과분석

지반굴착에 따른 지중변위의 발생은 도심지 지반굴착에 있어서 굴착주변지반에 인접된 지하매설물 및 인접구조물의 영향평가에 매우 중요하며, 지중변위의 발생범위 및 최대지중변위의 발생심도에 대하여 주목할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 단단계 지반굴착시 선행하중의 적용에 따른 지중변위의 영향을 분석한 결과 그림 15~18과 같다.

3.4.1 선행하중에 의한 주변지반 지중변위 분석

벽체두께 4mm에 선행하중을 50%, 70%로 적용한 경우 그림 15와 16에 나타난 바와 같이 선행하중의 증가에 따라 벽마찰이 있는 경우 지중변위가 억제되는 결과를 확인할 수 있었다.

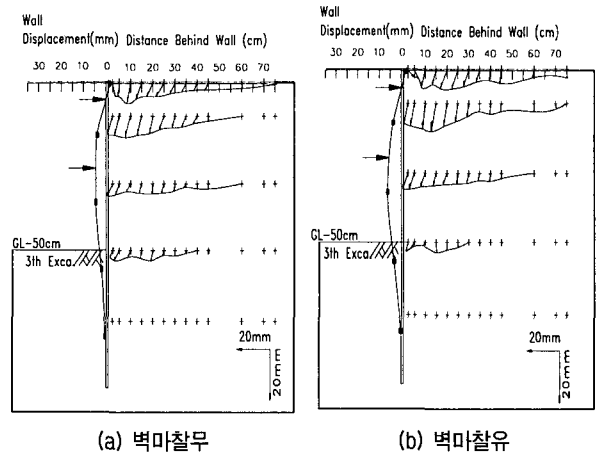


그림 15. 4mm벽체에 선행하중 50%적용시 지중변위 분포

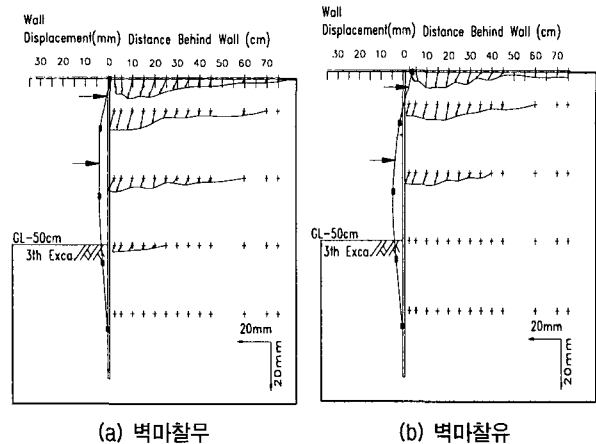
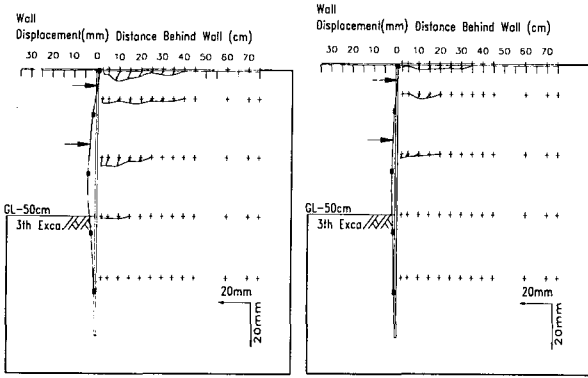
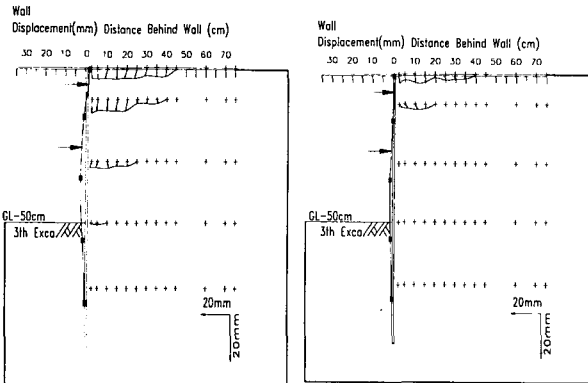


그림 16. 4mm벽체에 선행하중 70%적용시 지중변위 분포



(a) 벽마찰무시 (b) 벽마찰유

그림 17. 7mm벽체에 선행하중 50%적용시 지중변위 분포



(a) 벽마찰무시 (b) 벽마찰유

그림 18. 7mm벽체에 선행하중 70%적용시 지중변위 분포

벽마찰이 없는 경우 선행하중의 증가에 따른 지중변위의 억제효과는 벽마찰이 있는 경우에 비하여 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

7mm 벽체에 선행하중을 적용한 모형실험에 대하여 지중변위 결과는 그림 17과 18에 나타내었다. 7mm 벽체의 경우 4mm, 5mm 에 비하여 벽체강성이 커 지중변위의 영향 범위 및 지중변위의 크기는 현저히 감소하였고, 지중변위의 발생범위도 4mm, 5mm 벽체에 비하여 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 선행하중에 의한 벽체변위 및 지중변위와 같은 지반거동의 억제효과는 벽체강성이 크고, 선행하중의 크기가 증가됨에 따라 그 효과는 큰 것으로 나타났다.

그림 19, 20 및 21은 지중심도비와 최대지중변위율의 관계를 나타낸 것으로 벽체강성의 증가와 선행하중의 증가에 따라 지중변위율의 감소가 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 선행하중의 적용에 따른 벽체수평변위 및 지표침하의 분석에서도 나타난 결과로 선행하중의 증가와 벽체강성의 증가에 따라 지중변위가 억제되는 효과가

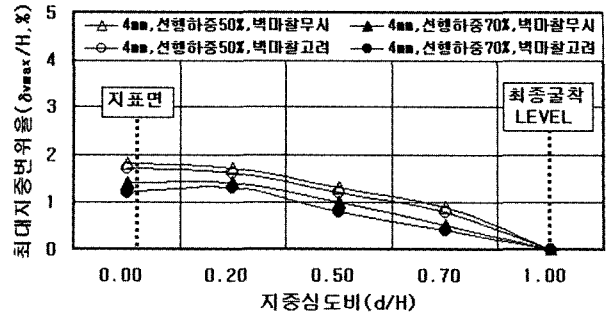


그림 19. 선행하중에 따른 지중심도비와 지중변위율의 관계

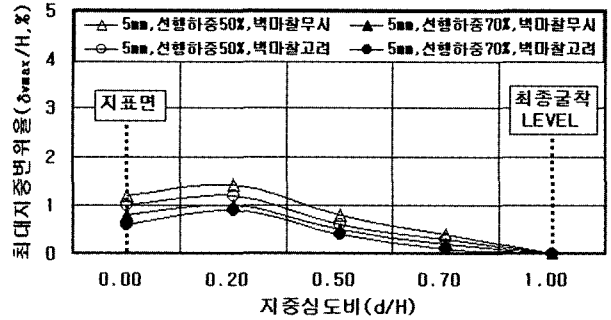


그림 20. 선행하중에 따른 지중심도비와 지중변위율의 관계

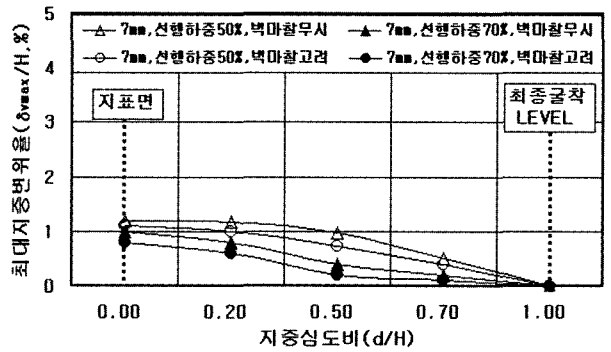


그림 21. 선행하중에 따른 지중심도비와 지중변위율의 관계

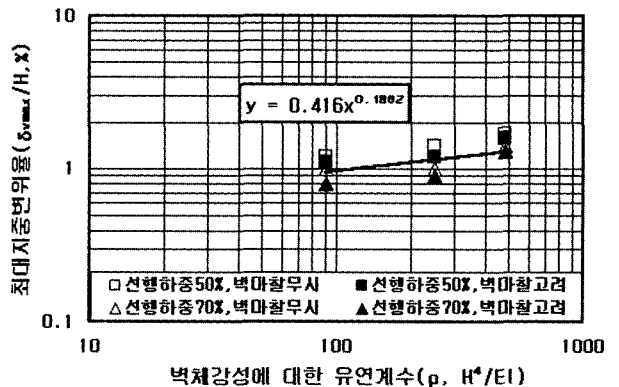


그림 22. 선행하중에 따른 심도비와 지중변위율의 관계

있음을 확인할 수 있다.

또한 그림 22는 사질토지반에서 버팀지지체에 선행하중을 적용할 경우에 벽체강성과 최대지중변위율의

관계를 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\text{최대지중변위량} = 0.42 \left(\frac{H^4}{EI} \right)^{0.183} \quad (1)$$

3.5 모형실험결과와 기존연구의 비교

3.5.1 벽체변위와 지표침하 비교분석

모형실험의 타당성을 확인하기 위하여 기존 실대형 실험과 현장자료에 의한 연구결과와 비교, 분석하여 유사경향과 차이점을 고찰하여 본 연구에 적용된 모형실험의 타당성을 확인하였다.

그림 23은 Clough(1975)에 의하여 유한요소 수치해석을 수행하여 선형하중의 적용에 따른 벽체 수평변위와 지표침하의 감소효과를 나타낸 것이다.

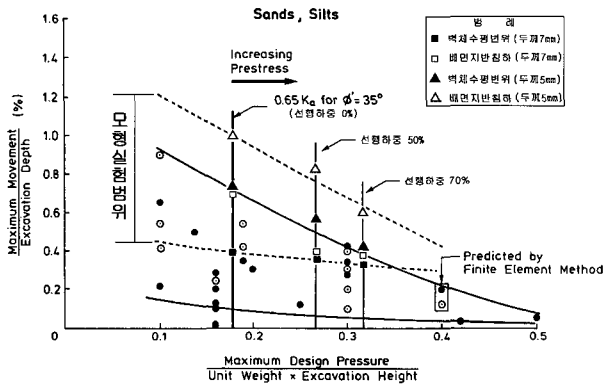


그림 23. 선형하중의 적용에 따른 벽체변위와 지표침하의 감소효과 비교(Clough, 1975)

본 모형실험 중 선형하중에 대한 결과를 비교하여 보면 벽체강성이 적은 5mm 벽체의 경우 Clough의 연구결과에 비하여 지표침하가 다소 크게 나타났으며, 7mm 벽체와 같이 강성은 큰 경우에는 Clough의 결과와 잘 일치하였다. 이 결과에서도 선형하중의 증가에 따라 벽체변위 및 지표침하가 감소하는 것으로 나타났으며, 선형하중이 50%이상으로 증가하게 되면 벽체변위와 지표침하의 감소효과는 상대적으로 적어지게 된다.

3.5.2 벽체배면에 작용되는 토압분포 및 변화 비교 분석

그림 24는 모형실험에서 얻은 벽체강성별 토압분포를 나타낸 것으로 Rankine의 정지토압(Ko)과 주동토압(Ka) 및 Peck 토압과 비교한 것이다. 이 모형실험 결과를 이용하여 설계토압도(Design earth pressure envelope)를 나타내면, 최소 0.21rH에서 최대 0.32rH의 토압이 그림 24와 같이 분포한다.

기존토압이론과 비교하여 보면 전체적인 토압분포는 Peck 토압보다 크게 분포하고, 벽체상부 0~0.6H까지는 벽체변위에 의한 아칭효과로 정지토압(Ko)이상의 토압이 분포하며, 최종굴착면에서는 Peck 토압(0.65 Ka) 정도의 토압이 작용하고 있음을 알 수 있다.

그림 25는 모형실험에서 나타난 모형토압분포도를 기존의 흙막이구조단면 결정에 제한된 설계토압도와 비교한 것이다.

이 결과에서 모형실험에서 얻은 토압분포도는 기존

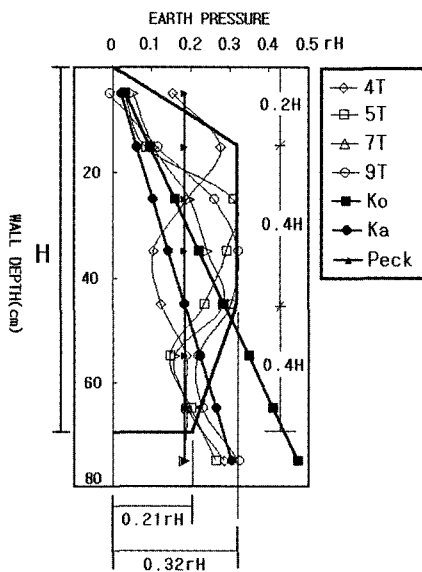


그림 24. 벽체강성별 토압분포에 대한 모형실험결과

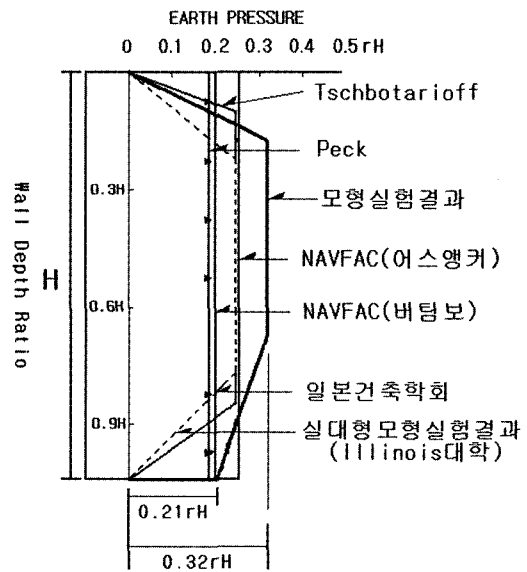


그림 25. 흙막이구조 단면결정 설계 토압과 모형실험토압의 비교

의 Tschbotarioff, Peck, NAVFAC(어스앵커, 버팀보), 일본건축학회 및 Illinois대학(참고문헌 1 참조)의 실험 모형실험 연구결과에 비하여 굴착면에 주동토압이 나타나고 있으며, 토압분포도에서 최대토압을 비교하면 Terzaghi-Peck의 경험토압에 비하여 최소 30%에서 최대 60%의 토압증가를 나타내고 있다. 이는 모형실험에서는 다단계 굴착시 버팀대에 적용된 선행하중에 의한 벽체변위의 억제로 토압이 증가되는 결과로 판단되며, 모형실험 토압분포도를 흙막이 구조설계 검토에 적용하면 기존의 설계토압보다 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

4. 결론

도심지 굴착에 있어서 흙막이 벽체 및 주변지반의 거동에 영향을 미치는 영향요인에 대하여 벽체강성과 벽마찰의 영향, 버팀대에 작용되는 선행하중의 영향을 규명하기 위하여 사질토지반에 대한 굴착모형실험을 수행하였으며, 굴착단계에 따른 토압분포 및 변화, 벽체의 수평변위, 배면지반침하, 최대 벽체변위와 최대 지표침하의 상관관계에 대한 비교분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벽마찰에 의한 지표침하 감소는 상대적으로 강성이 작은 벽체와 상대밀도가 더 큰 사질토지반에서 크게 발생하고 있으며, 벽체강성이 증가함에 따라 벽체수평변위율과 최대지표침하율은 감소하였다.
- (2) 벽체강성 및 지반조건에 따라 선행하중의 적용으로 벽체변위가 억제되므로 일정심도에서 아칭효과(k_v 이상의 토압)가 발생됨을 확인하였고, 아칭효과의 발생위치는 벽체강성이 작은 경우에는 벽체 상부 $0.1H \sim 0.5H$ 에 분포하고 있으며, 벽체강성이 큰 경우에는 $0.1H \sim 0.7H$ 까지 아칭효과의 분포범위가 넓어져 강성벽체의 토압분포와 유사한 분포를 나타내었다.
- (3) 최종굴착시 선행하중 적용에 따른 벽체의 최대수평변위와 지표침하는 벽체강성이 증가함에 따라 감소하였으며, 선행하중이 없는 경우와 비교하여 최대수평변위와 지표침하는 선행하중을 50%와 70% 적용시 감소하여 벽체강성과 선행하중의 적용이 벽체거동을 억제하는데 효과적임을 확인하였다.

- (4) 벽체변위와 지표침하의 상관관계에 있어서 선행하중을 적용하지 않은 경우 최대지표침하는 최대수평변위보다 1.6배($\delta_v=1.6\delta_h$) 큰 것으로 나타났으며, 선행하중을 50% 적용한 경우는 1.12배($\delta_v=1.12\delta_h$), 70% 적용한 경우에는 최대지표침하와 최대수평변위가 일치하는($\delta_v=1.0\delta_h$) 결과를 얻었다.
- (5) 사질토지반에 대한 굴착모형실험에서 버팀지지에 선행하중을 적용할 경우 벽체강성과 최대지중변위율의 관계는 최대지중변위량 = $0.42 \left(\frac{H^4}{EI} \right)^{0.183}$ 과 같은 관계식으로 나타낼 수 있었다.

참고 문헌

1. 김학문 외, “도심지 지반굴착에 따른 토류구조물의 설계 및 안전관리 시스템 개발”, 1997년 10월, 건설교통부.
2. 백규호 외, “버팀대 선행하중의 주변 지반 변위억제 효과”, '98 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.475-478.
3. Bowles, J. E., “Foundation Analysis and Design”, 5th Edition, MGH, 1996, pp.589-623, pp.781-782.
4. Clough, G.W., “Deep Excavations and Retaining Structures”, Proceedings of the Short Course - Seminar on Analysis and Design of Building Foundations, Pennsylvania, 1975, pp.417-465
5. Das, B.M., “Principles of Foundation Engineering”, 3rd ed. ITP, 1995, pp.296-304.
6. Hans H. Vaziri., “Numerical study of parameters influencing the response of flexible retaining walls”, *Canadian Geotechnical J.*, 1996, pp.290-308.
7. Kim, H. M., “The Theoretical and Site Behavior of a Braced Diaphragm Wall-A Comparison”, *First Korea-Japan Geotechnical Seminar*, Oct., 1990, pp.111-127.
8. NAVFAC, Design Manual 7.2-Foundations and Earth Structures., Department of Navy, *Naval Facilities Engineering Command*, Washington, D.C., 1982.
9. O'Rourke, T. D., & Cording E. J., & Boscardin, M., “The Ground movements related to braced excavation and their influence on adjacent buildings”, U.S. Department of Transportation, Report no. DOT-TST 76, T-23, 1976.
10. Palmer, J. H. & Kenny, T. C., “Analytical Study of Braced Excavation in Weak Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.9, 1972, pp.145-164
11. Rowe, P. W., “A Theoretical and Experimental Analysis of sheet Pile Walls”, *Proc. Int. of Civil Engineers*, London, Vol.4, Part I, pp.32-69.
12. Taylor, R. K. & Attewall, P.B., “Ground Movements and Their Effects on Structures”, Blackie & Son Ltd, 1984, pp.76-109.
13. Terzaghi, K. & Peck, R.B., “Soil Mechanics in Engineering Practice”, 2nd ed., WIE, 1967, pp.202-206, pp.394-413.
14. Tschbotarioff, G. P., “Foundations, Retaining and Earth Structures”, *Second Edition*, McGraw Hill, New York, pp.642.

(접수일자 2002. 6. 17, 심사완료일 2003. 8. 25)