

굴착모형실험을 통한 토류벽체 및 지반거동에 관한 연구

Model Tests for The Behavior of Propped Retaining Walls in Sand

이 봉 열*¹
Lee, Bong-Yul

김 학 문*²
Kim, Hak-Moon

Abstract

Model tests on propped retaining walls were performed for the investigation of wall displacement, distribution of earth pressure, surface settlement and underground movement at various excavation stage in sand.

The result of model tests on the trough of surface settlement showed considerable difference depending on the characteristic of wall stiffness, wall friction and soil condition. The location of maximum underground movement were found to be at range of 0.15H to 0.1H(H: Final excavation depth). Effect of arching by the redistribution of earth pressure were closely related to the stiffness of wall as well as the soil condition.

The wall displacement and earth pressure distribution were simulated by elasto - plastic beam analysis program and finite element method with GDHM model respectively.

The result of elasto-plastic analysis showed some discrepancy on the wall displacement and earth pressure, but result of underground movement by FEM with various wall stiffness were in good agreement with the model tests.

요 지

본 연구에서는 다단계 굴착시 연성토류 벽체의 수평변형, 굴착단계별 토압변화 및 분포, 그리고 배면지반의 지표침하와 지중변위의 분포를 규명하기 위하여 벽체강성, 벽마찰의 유무 및 지반조건에 대하여 굴착모형실험을 실시하였다. 모형실험 결과 벽체강성 및 벽체와 배면지반의 벽마찰각에 유무에 따른 지표침하 형태는 다소 차이를 나타내었으며, 지중변위 결과는 최대지중변위의 발생심도는 심도비 0.1H에서 0.15H(H는 최종굴착심도)의 범위에서 나타났다. 그리고 벽체의 강성에 따라 배면지반의 토압재분배 현상인 아칭효과는 벽체강성과 지반조건에 직접적인 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

*1 정회원, 단국대학교 대학원 토목공학과 박사수료

*2 정회원, 단국대학교 공과대학 토목공학과 교수

모형실험에서 얻은 벽체변위 및 토압분포는 기존 탄소성보법 프로그램으로 또한 지표침하 및 지중변위는 본 연구진에 의해 개발된 GDHM재료모델을 이용한 유한요소법 프로그램으로 각각 비교분석하였다. 기존 탄소성보법 프로그램을 이용하여 모형실험을 해석한 결과 벽체변위 및 토압분포는 모형실험 결과와 상이한 결과를 얻었으며, GDHM재료모델을 적용한 유한요소해석에서는 벽체수평변위의 형태는 다소 상이한 결과를 얻었으나 배면지반의 지중변위 분포는 벽체강성에 따라서 유사한 결과를 얻었다.

Keywords : Underground settlement, Surface settlement, Earth pressure, Wall displacement, Arching effect, Numerical Analysis, GDHM Model, Elasto-Plastic Analysis

1. 서론

다양한 토류벽체에 작용하는 토압을 정확하게 산정하는 문제는 벽체의 안전하고 경제적인 설계를 위한 중요한 요소이며, 특히 도심지 근접시공을 고려한 지반거동의 예측 및 인접구조물의 보호는 향후 지반공학에서 더욱 연구되어야 할 분야중 하나이다. 따라서 도심지 깊은 굴착을 염두에 두고 다단계 굴착시 연성벽체의 변형 및 토압의 재분배 및 지표침하와 지중변위 양상을 규명하기 위하여 다단계 굴착모형 실험을 실시하였으며, 다단계 굴착시 토류벽체와 주변지반의 거동을 평가하기 위하여 벽체변위, 벽체의 배면토압, 버팀대 하중, 배면지반의 지표침하 및 지중변위를 측정하여 분석하였다. 또한 모형실험에서 얻은 벽체변위 및 토압분포는 기존 탄소성보법 프로그램을 이용, 해석하여 비교검토 하였고, 지표침하 및 지중변위는 지반거동을 확인할 수 있도록 GDHM재료모델을 적용한 유한요소 프로그램을 이용, 비교검토 하였다.

2. 토류벽체의 거동과 토압

일반적으로 옹벽과 같은 강성 토류벽체에서 토압산정은 지반내 임의의 흙 요소에 대하여 소성평형이론에 근거한 Rankine-Resal(1857)의 토압이

론과 파괴흄뻐기를 강체로 가정하여 흙과 옹벽의 마찰을 고려한 Coulomb(1776)토압이론을 적용할 수 있다.

그러나 굴착심도에 비하여 비교적 강성이 작은 연성 토류벽체를 버팀구조체로 지지하며 굴착하는 경우, 굴착에 따른 벽체의 거동은 옹벽과 같은 강성벽체와는 상이한 것으로 알려져 있다. 그 이유는 토압분포가 지반조건뿐만 아니라 벽체의 거동에 영향을 받는 흙-구조물 상호작용에 따라 달라지게 되며, 버팀구조의 형식과 관련되므로 강성 토류벽체의 토압분포와는 일치되지 않는다.

연성 토류벽체에 작용하는 배면토압은 벽체의 변형거동에 지배되며, 굴착진행에 따라서 벽체변위는 굴착 깊이에 따라서 점차적으로 누적되어 증가하게 된다. 이때 벽체변위는 지반조건, 굴착깊이에 따른 벽체강성 및 버팀구조체의 종류 등과 같은 여러 요소들의 영향을 받게된다.

주동, 수동토압을 유발시키는 강성벽체의 변형에 대한 연구는 Terzaghi(1936), Broms & Ingelson(1972), Carder(1977), Matsumoto(1987), Sherif(1984), 등에 의해서 수행되었으며, 모형실험을 통한 벽체변형과 배면토압과의 상관관계에 대한 연구는 Rowe(1952), Jakobson(1958), Kezdi(1958) 등에 의하여 연구되었다. Bowles(1996)는 단계별 굴착시 연성 토류벽체의 변형거동에 따른 토압분

포를 제안하였으며, Terzaghi와 Peck(1969) 및 Tschebotarioff(1973)등은 현장에서 계측된 버팀하중을 토압분포로 환산한 경험토압을 발표하였다. 연성 토류벽체의 굴착에 따른 토압분포에 대한 연구는 초기 캔틸레버 벽체상태 또는 1단버팀 벽체에 대하여 많은 연구발표가 있었으나 깊은 굴착의 경우와 같이 다단계 굴착에 대한 토압분포 및 변화에 대해서는 아직 명확히 규명되지 않고 있다.

2.1 다단 굴착시 벽체거동과 작용토압

토류벽체에 작용하는 토압의 산정방법에는 소성 평형이론에 근거하여 강성 토류벽체에 적용되는 Rankine 또는 Coulomb의 삼각형 분포토압과 현장 계측치에 바탕을 둔 Terzaghi-Peck(1969) 및 Tschebotarioff(1973)의 경험토압 그리고 벽체의 변형량에 따라 변화하는 흙-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)에 의한 방법이 있다. 그러나 토압의 크기와 분포상태는 토질의 종류, 벽체 및 버팀대의 종류, 벽체의 변형량 및 굴착과 배수조건 등의 다양한 변화 요소에 따라 변화하기 때문에 정확한 이론식으로 표현하기는 용이하지 않다.

또한 굴착이 진행되면서 토류벽을 버팀대 또는 앵커로 지지하는 경우 벽체상부의 변형은 버팀대의 지지로 억제되어 토압이 증가하며, 하부 굴착부는 벽체변형이 커짐으로서 토압의 재분배에 의하여 직사각형 형태로 변화하는 경험토압을 Terzaghi-Peck(1969) 및 Tschebotarioff(1973)가 제안하였다. 그러나 이들 경험토압은 단지 버팀대 하중측정치를 단순히 토압으로 표시하였기 때문에 토류벽의 설계에 적용하는 겉보기토압(Apparent Earth Pressure)은 인접구조물의 평가, 토류벽체 및 버팀지지 구조체의 단면 검토에 적용하는데는 일반적으로 적합치 않은 것으로 알려져 있으며, 흙-구조물 상호작용을 고려한 탄소성지반상 보법 프로그램에 의한 해석결과를 이용하여 토류벽체 및 버팀지지 구조체의 단면

검토를 실시하고 있는 것이 일반적이다.

2.2 기존 모형실험에 대한 연구고찰

Hansen(1953)은 벽체가 15cm×15cm인 작은 크기의 모형실험으로 벽체 거동에 따른 파괴면에 대한 연구를 하였고, 연구결과 서로 다른 벽체 거동과 벽마찰하에서의 파괴궤적의 크기와 형태가 다를 수 있음을 지적하였으나, 벽체 배면지반의 토압을 측정하지는 못하였다.

Rowe(1958)는 앵커의 항복에 따른 강널말뚝 배면 지반의 아칭효과를 고려할 수 있도록 모형화하였다. 실험은 정지토압계수 K_0 가 1보다 작은 모래지반에서 강성이 다른 벽체에 대해 앵커지지로 실시되었으며, 그 결과 연성벽체의 휨 모멘트가 과대평가됨을 확인하였고, 모멘트 감소계수를 사용할 것을 제안하였다. 또한 Rowe는 유연계수와 모멘트 감소계수를 정의하였다.

$$\text{유연계수 } \rho = \frac{H^4}{EI} \quad (\text{m}^3/\text{MN}),$$

$$\frac{M}{M_0} = \text{모멘트 감소계수}$$

여기서, 유연계수 ρ 는 벽체전체길이 $H(\text{m})$, 벽체의 탄성계수 $E(\text{MN}/\text{m}^2)$, 단위길이당 단면 2차 모멘트 $I(\text{m}^4/\text{m})$ 로 표시되며, 벽체의 강성에 반비례하고 벽체길이의 4승에 비례하는 것으로 벽체의 유연성을 나타내는 계수로 정의하였다.

Bransby와 Milligan(1982)은 지반을 느슨 또는 조밀하게 조성하였으며, 벽체는 Rowe의 유연계수에 의해 정의된 다양한 강성을 가진 벽체를 사용하여 캔틸레버 벽체상태에서의 거동을 규명하려 했으며, 벽체변형과 흙의 거동 및 파괴면을 측정하기 위해 X선 측정법을 사용하였다. 이 모형실험 결과 벽면 거칠기에 따른 변형거동은 비교적 적은 것으로 나타났으며, 느슨한 지반과 조밀한 지반의 차이에 의한 변형거동 차이가 나타남을 알

수 있었다.

Sherif와 Fang(1984)은 강성벽체가 벽체상부 및 저부를 중심으로 회전하는 경우와 벽체가 수평 이동하는 경우에 대하여 벽체회전에 따른 각 깊이에서의 토압을 벽체에 부착된 토압계를 사용하여 측정하였으며, 깊이 및 전단저항각의 크기에 관계 없이 주동토압에 이르게 하는 수평변위가 일정한 값을 가지고 있음을 규명하였다.

또한 Fang과 Ishibashi(1986)는 모형실험 기구를 사용하여 벽체회전에 따른 토압계수 변화 및 아칭효과에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 Fang과 Ishibashi는 4개의 하중계를 이용 수평토압계수 K_h , 벽마찰각 δ 와 작용점의 위치 h/H 를 벽체의 각 이동단계에 따라 주동토압계수 K_A 는 측정된 수평 토압의 합력과 연직성분의 합력 $\gamma H^2/2$ 와의 비이며, K_{Ah} 값은 벽체회전각에 따른 주동상태에서의 수평주동토압계수로 정의하였다. 그러나 작용점의 위치(h/H : h 는 토압 작용점의 위치)는 정지상태에서 벽체저면으로부터 $0.33H$ 가 되나 벽체 최상부를 중심으로 회전하면서 아칭현상으로 벽체상부의 토압은 증가하고 하부는 감소해 작용점(h/H)이 $0.46H$ 정도로 높게 나타나는 것을 확인하였다.

이와 같은 아칭현상으로 벽체가 최상단을 중심으로 회전하면서 벽체 상단부의 느슨한 토립자는 조밀해져 아칭영역이 서서히 발달되므로 수평토압은 증가되며, 이와는 대조적으로 조밀한 토립자의 경우에는 체적변화가 약간 발생되나 벽체회전량이 어느 이상되면 아칭영역의 파괴로 수평토압이 급격히 떨어진다.(그림 2.1, 2.2참조)

벽마찰각 δ 는 벽체의 회전에 토체가 벽면을 따라 미끄러지지 않으므로 증가하여 $\delta = 24.7^\circ$ 에서 일정해지며, 또한 주동토압계수 K_{Ah} 는 Coulomb의 경우와 동일하게 흙의 밀도가 증가할수록 감소하나 벽체상부의 아칭효과로 평균적으로 Coulomb값보다 17% 더 증가하는 것으로 나타났다.

Potts와 Fourie(1984,1985)는 벽체 강성에 따른

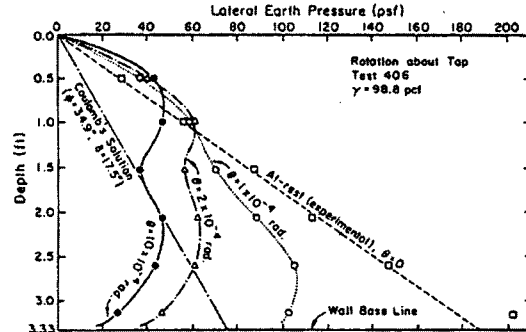


그림 2.1 벽체상부 중심으로 회전시 벽체회전각에 따른 수평토압의 분포 (Fang & Ishibashi, 1986)

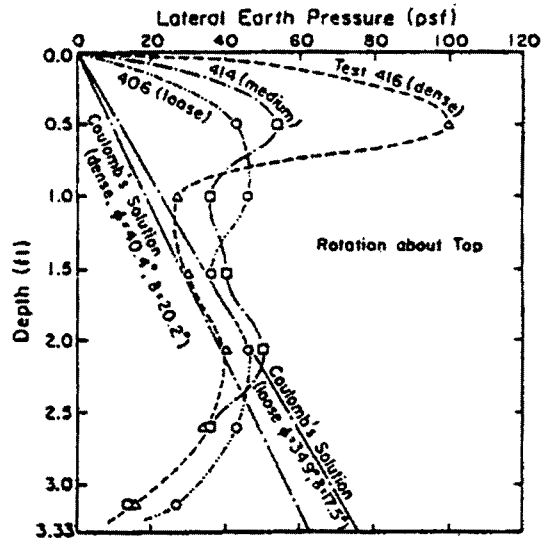


그림 2.2 벽체상부 중심으로 회전시 주동상태에서 수평토압의 분포 (Fang & Ishibashi, 1986)

토류벽체의 거동에 대한 유한요소법 수치해석을 통하여 벽체와 지반의 접촉면에 발생하는 벽마찰각 δ 를 고려하고, 벽체강성 변화에 따른 토압분포 및 변위를 연구하였으며, 이 연구를 통해 벽체강성에 따른 벽체변위의 차이 및 토압분포는 강성벽체보다는 연성벽체의 상부 버팀지지된 곳에서 정지 토압과 수동토압 사이의 토압분포를 나타내어 아칭효과에 의한 토압증가가 있음을 확인하였다.

2.3 단계별 굴착시 토류벽체의 변형거동과 토압

단계별 굴착시 연성토류벽의 변형거동에 대하여 Bowles(1996)는 지지구조의 하중이 캔틸레버 단계에서의 토압보다 클 것이라고 하였으나 증가된 토압이 얼마인지는 정량적으로는 밝히지 않았으며, 특히 캔틸레버 단계에서는 배면지반의 응력상태는 소성평형상태가 되고 그에 상응하는 벽체변위가 발생하며 이때의 변위를 감소시키기 위하여 지지구조에 선행긴장력을 가하는 경우 흙을 완전탄성체라고 가정하면 증가된 토압의 크기는 변위가 감소된 만큼 주동토압(K_a)에서 정지토압(K_0) 방향으로 증가된다고 볼 수 있다. 그러나, 소성평형상태의 배면 흙에 대하여 벽체 이동량 만큼의 토압이 증가하는 것으로 가정하면 이러한 변위를 일으키기 위한 지지구조의 선행긴장력은 그 크기에 따라서 정지토압(K_0)과 주동토압(K_p) 사이의 토압에 해당될 것이다. 그러므로 본 연구의 목적중의 하나는 벽체강성에 따른 유연계수(flexibility number)와 지반조건에 대하여 아칭효과 및 토압의 재분배에 대하여 굴착단계별로 그 변화 및 영향을 분석하여 실제 다단굴착공사에 적용할 수 있도록 하는데 있다.

3. 다단굴착에 따른 토압분포 및 지반거동 연구를 위한 모형실험장치 및 방법

상기에서 고찰한 내용을 근거로 하여 본 연구에 사용된 토조 내부의 크기는 길이 1.0m, 길이 1.2m, 폭 1.0m로 시험벽체 전면과 좌측면은 두께 5mm의 강철로, 뒷면과 우측면은 토조 내부를 관찰할 수 있도록 두께 30mm의 투명한 경질아크릴판으로 제작하였다. 모형실험 토조의 측면은 매끄러운 아크릴판을 부착하여 벽면마찰을 최소화하여 평면변형조건으로 하였으며, 시험벽체의 중앙에서

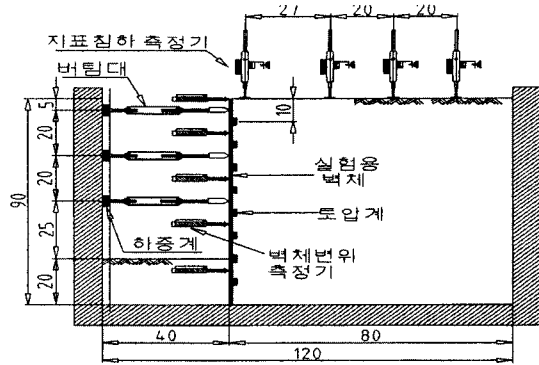


그림 3.1 토조모형실험에 적용된 계측기기의 설치도(단위 : cm)

벽체에 작용하는 토압, 벽체의 수평변위, 지표 및 지중침하를 측정하였다.

3.1 모형실험 측정장치

본 모형실험에서 벽체변위, 지표침하, 버팀하중 및 토압을 측정하기 위해 측정장치는 기기의 용도 및 정밀도에 의해 선정하였으며, 확실한 데이터의 검증을 위해 계측기마다 계기보정 및 계기검증실험을 실시하였다. 실험시 사용된 계측기기의 정밀도 및 모형도는 표 3.1과 그림 3.1에 나타내었다.

특히 상기 측정장치 중 벽체에 작용하는 토압을 직접적으로 측정하기 위한 pressure cell을 특별히 제작하여 사용하였다. 이는 현장에 적용하는 토압계의 경우 높은 응력범위에 대하여 적용하고 있으므로 실험실에서 사용하는 토압계의 경우 낮은 응력범위에서 측정할 수 있는 계기의 개발에 주안점을 두어 수행하였다. 실험실에서 측정하는 토압은 최대 $7.0\text{kg/cm}^2 \sim 0.01\text{kg/cm}^2$ 의 범위를 측정할 수 있도록 토압계를 설계하였다.

토압계의 특징은 낮은 응력범위의 측정값에 대한 정확도에 주안점을 두었고, 측정감도(sensitivity)를 높였으며, 설치가 용이하도록 하였다. 또한 10개의 토압측정기를 일체화시켜 취급이 용이하도록 하였고, 가능한 복잡한 측정과정을 제거시켜 측정값

표 3.1 실험시 사용된 계측기기 종류 및 정밀도

계 측 기 기	계 측 항 목	측 정 개 소	정 밀 도
지표침하측정기 (digital gage)	지표침하측정	10개소	0.01mm
토 압 계 (pressure cell)	토압측정	8개소	0.01 kg/cm ² ~ 7.0 kg/cm ²
하 중 계 (load cell)	버팀하중측정	4개소	0.01 kg ~ 125 kg
벽체변위계 (potential meter)	벽체변위측정	5개소	0.01 mm ~ 50 mm

표 3.2 모형실험을 위한 조성지반의 특성치

지반종류	단위중량 (g/cm ³)	내부마찰각 (°)	상대밀도 (%)	간극비	초기탄성계수 (t/m ²)
A 지반	1.43	36	53	0.832	2,143
C 지반	1.38	32	36.31	0.899	976

의 오차를 최소화 하였다.

토조 실험에 사용된 버팀 하중 측정을 위한 하중계(load cell)의 정확도 검증을 실시하였다. 버팀 하중은 역토압 산출에 있어서 중요한 자료가 되므로 하중계의 정확한 하중측정은 매우 중요한 작업의 하나이므로 제작된 하중계에 정확한 하중을 재하하여 그에 대한 정확한 측정값을 확인하였다.

3.2 실험지반 재료의 특성 및 실험벽체 제원

모형실험을 위한 지반조성용 시료는 주문진 표준사로 비중실험 결과 $G_s = 2.62$ 이며, 입도분석 결과는 유효경 D_{10} 이 0.4mm, D_{30} 이 0.55mm로서 균등계수 C_u 가 1.375로 나타나 입도분포가 매우 균등하고, 통일분류법상 SP로 분류되었으며, 모형실험을 위한 조성지반의 역학적 특성치는 자동화 삼축 압축시험기의 강도시험을 통하여 확인하였

으며, 표 3.2와 같다. 시험지반은 일정한 단위밀도의 지반을 조성하기 위하여 강사장치를 사용하였으며, 1회 포설시 5 cm를 포설할수 있도록 설계, 제작되었다.

토조의 크기 및 전체 모형도는 그림 3.2에 나타내었다. 벽체는 연성플라스틱이 사용되었으며, 그 제원은 표 3.3과 같다.

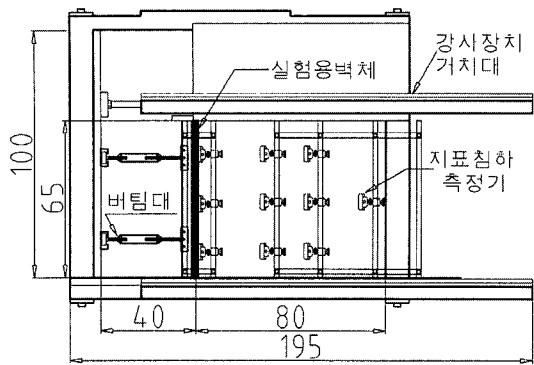
3.3 모형실험 방법

실험은 크게 계측기기의 설치, 벽체설치 및 지반조성과 굴착실험 실시단계의 2단계로 나눌 수 있다.

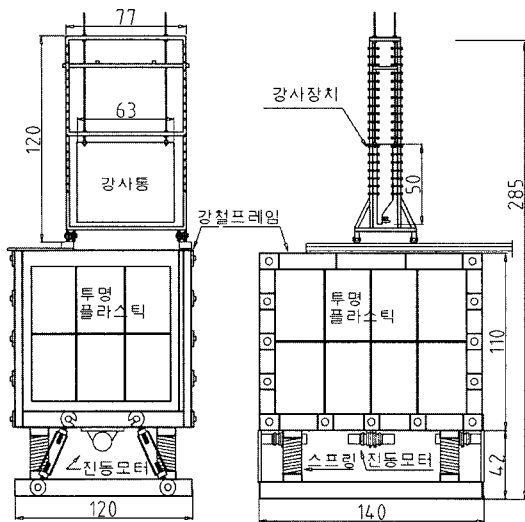
3.3.1 실험준비 단계

1) 계측기기의 설치

모형실험 지반 조성전 벽체변위계, 버팀장치, 토압계 등의 계측기기는 미리 설치되었으며, 이는



(a) 평면도



(b) 정면도 (c) 측면도

그림 32 모형실험장치 및 계측장치 모형도 (단위: cm)

굴착초기상태부터 굴착단계별 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 이후 실험지반 조성이 끝난 후, 지표침하계를 그림 3.1 및 3.8과 같이 지표면 10 개소에 설치하였다.

2) 실험벽체 설치

본 연구에 사용된 실험벽체는 연성플라스틱으로 벽체강성은 벽체두께에 따라 휨강성으로 변화시켰으며, 벽마찰각이 발휘될 수 있도록 스프레이 본드를 벽체에 도포하여 실험지반과 동일한 모래를 벽체에 부착하였고, 약 24시간 방치하여 벽마찰각을 실험지반의 내부마찰각과 동일하게 성형하였다.

3) 실험지반 조성

원하는 실험지반의 단위중량을 조성하기 위해 강사장치를 사용하였으며, 강사장치에 의한 낙하고 및 강사통의 낙하폭에 의한 단위중량 실험을 본 실험전에 실시하였으며, 채택된 지반조성조건은 단위중량 $1.38t/m^3$ 의 경우 낙하고 10cm, 강사낙하폭 5mm로 하였고, 단위중량 $1.43t/m^3$ 의 경우는 강사낙하고 30cm, 강사낙하폭 5mm로 하였다. 강사높이에 따른 건조단위중량의 변화실험 결과는 다음 표 3.5와 그림 3.7과 같다.

3.4 지중변위 측정방법

지반굴착으로 인한 지표침하 및 지반의 지중변위는 인접구조물에 지대한 영향을 미치게 되며, 지중변위의 분석 및 평가는 인접구조물의 손상여

표 3.3 실험용벽체의 종류 및 제원

벽체두께 (mm)	탄성계수 E (t/m^2)	단면2차모멘트 I (m^4/m)	휨강성 EI ($t \cdot m^2$)	유연계수 ρ (m^3/t)
3.0	2.56×10^5	2.25×10^{-9}	0.57×10^{-3}	1,140
5.0	2.56×10^5	10.42×10^{-9}	2.67×10^{-3}	250

표 3.5 강사높이에 따른 건조단위중량의 변화

낙 하 고 (cm)	건조단위중량 (g/cm ³)	
	강사 낙하폭 5mm	강사 낙하폭 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

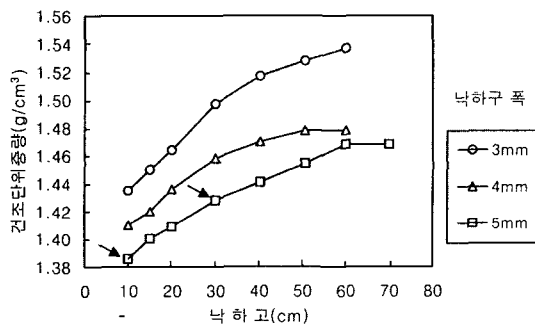


그림 3.7 강사높이 및 낙하구 폭에 따른 건조단위중량의 변화

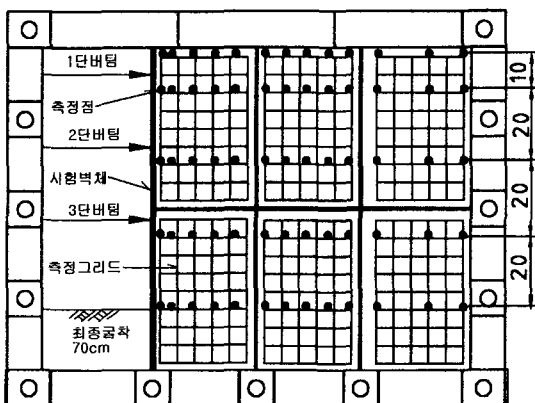


그림 3.8 실험토조내의 지중변위 측정방법(단위 : cm)

부 및 거동평가에 중요한 부분을 차지하게 된다. 따라서 본 연구에서는 토조모형 실험시 그림 3.8 과 같이 지중변위의 측정을 실시하였으며, 지중변위점은 시험지반포설시 20cm간격으로 지중변위점을 시험지반지중에 매설하여 지반의 움직임에 따라 동일하게 거동하도록 하였으며, 지중변위의 거동을 측정하여 분석, 평가하였다.

4. 모형실험의 결과 및 분석

3장에서 제시한 모형실험장치, 계측장치 및 실험벽체를 사용하여 모형실험을 실시하였고, 실험결과에 대하여 굴착 단계별 토압변화 및 분포, 벽체수평변위, 지표침하의 분포 및 최대침하량, 각 단의 버팀대에 작용하는 버팀하중 및 심도별 지중변위의 분포 및 침하형태에 대하여 분석 고찰하므로써 굴착에 따른 토류벽체 및 주변지반거동을 규명하고자 하였다.

4.1 시공 단계별 토압분포 및 주변 지반 거동

본 연구는 벽체의 강성과 지반조건 및 벽마찰이 토류벽체의 토압분포와 주변 지반의 거동에 미치는 영향을 규명하고자 총 12종류의 모형실험 결과 중 대표적인 벽체 두께 5mm에 A지반과 벽체 두께 3mm에 C지반에 대한 실험결과를 그림 4.1과 그림 4.2에 나타내었다.

4.2 실측토압과 겉보기 토압 비교 분석

연성토류벽체의 변형에 의한 수평토압의 분포 및 변화에 대하여, 많은 학자의 관심사항이었으나, 초기 캔틸레버상태(1단계굴착)에서는 주동토압(Ka)이 분포됨을 확인하였다. 그러나 1단계 굴착 이후의 토압분포는 정확히 규명되지 않은 상태이므로 따라서 본 연구에서는 굴착단계별 토압변화 및 분포에 대하여 모형실험에서 측정된 실측토압

과 버팀대의 버팀하중의 측정결과를 상호비교, 분석하여 평가하였다.

4.2.1 모형실험을 통한 실측토압 분석

모형실험에서 단계별 굴착에 따른 토압은 토압계에 의한 실측토압과 하중계에 의한 버팀 하중을 측정하여 역토압을 환산 적용함으로써 토압계에

의한 실측토압의 검증이 이루어졌다.

그림 4.1과 4.2는 벽체두께 3mm와 5mm의 지반 조건별 실측토압과 버팀하중에 의한 역토압, Rankine의 주동 및 정지토압과 비교하여 나타내었다. 굴착단계별 토압의 변화 및 분포는 기존연구에서 제시한 바와 같이 초기굴착단계(1단계 굴착)에서는 벽체강성과 관계없이 캔틸레버 상태에

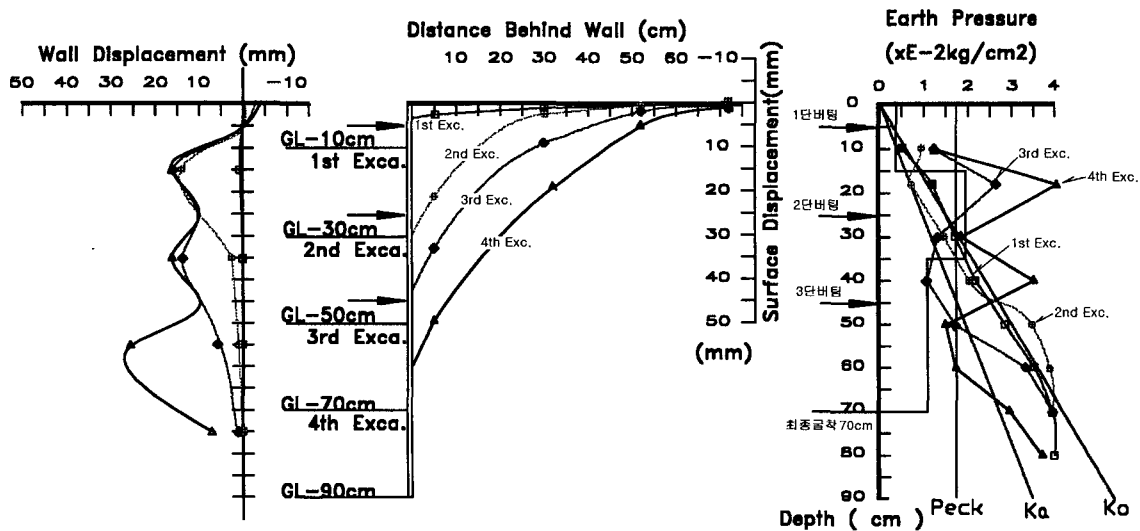


그림 4.1 두께 3mm, C지반 모형실험결과

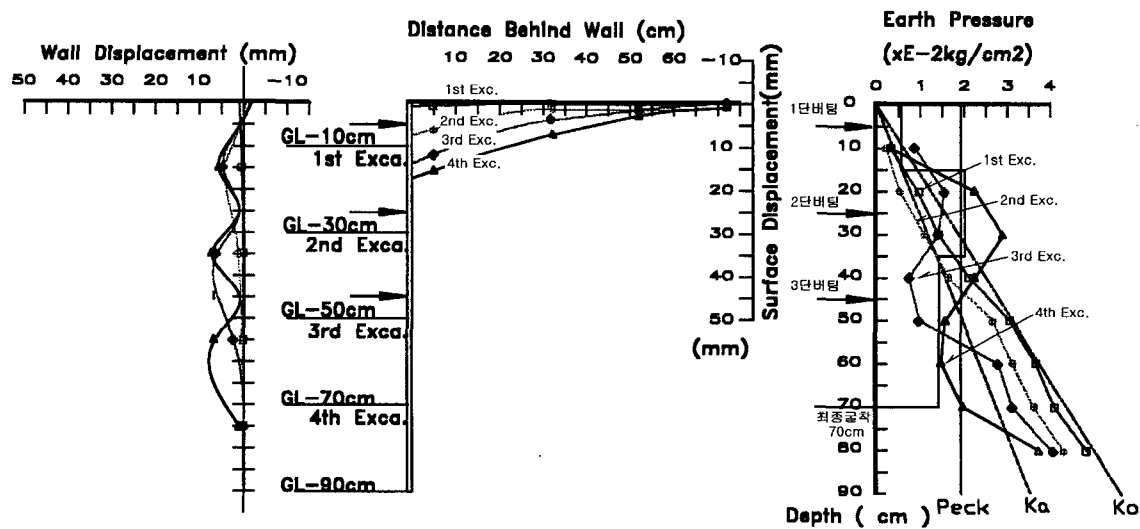


그림 4.2 두께 5mm, A지반 모형실험결과

서 주동토압(K_a)이 분포하고 있음을 알 수 있다.

2 단계 굴착시 토압분포 역시 벽체두께에 상관 없이 벽체가 굴착측으로 거동함으로써 굴착면 바로 위의 토압은 주동토압(K_a)으로 감소하나 굴착면 아래의 토압은 주동토압과 정지토압 사이에 분포하는 것으로 나타났다.

3 단계 굴착에서도 3, 5mm 벽체의 경우 굴착면 바로 위의 토압분포는 주동토압보다 작은 분포를 나타내었으나 2단 버팀대 상부의 토압분포는 정지토압보다 크게 작용하고 있으며 이는 아칭효과에 의한 토압의 재분배가 이루어진 것으로 사료되며, 이는 Sherif와 Fang(1984)의 벽체회전에 따른 토압변화 모형실험 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다. 또한 굴착면 아래에서의 토압분포는 1, 2단 굴착시와 동일하게 주동토압과 정지토압 사이에 분포하고 있다.

4 단계 굴착에서는 벽체의 두께에 따라 토압분포 양상이 다르게 나타나고 있다. 두께 5mm인 벽체에서는 3단굴착에서와 마찬가지로 3단버팀대 아래에서 굴착면 바로 위의 토압은 벽체가 굴착측으로 변형을 일으킴으로써 주동토압보다 작게 분포하나 1, 2단 버팀대 부분의 토압이 증가함으로써 그림 4.2와 같이 전체적으로 역S자 형태의 토압분포를 나타내고 있다.

그러나 벽체두께가 3mm인 경우에는 그림 4.1에 나타난 바와 같이 버팀대 사이의 벽체변형이 큰 이유로 토압이 전반적으로 고르게 분포하지 않고 있으며, 토압분포 형태는 그림 4.1과 같이 각 버팀대 부분의 토압이 크게 증가하였으나 버팀대 아래의 토압은 Peck의 경험토압과 유사한 크기의 분포를 보이고 있으며, 버팀대 상부의 토압분포는 벽체의 변형으로 발생한 변위면적에 비례하고 있음을 알 수 있다.

Bowles(1996)의 제안에서 벽체변형에 따른 순토압(net earth pressure)과 모형실험에서 측정된 측정토압(measured earth pressure)을 비교하면

Bowles가 제안한 토압분포와는 굴착면에서 약간의 토압이 나타나고 있으며, 이는 벽체변형에 따라서 토압의 증가 및 감소를 나타내므로 다단계 굴착에서 토압분포는 벽체변형에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

4.2.2 측정된 버팀하중과 경험토압에 의한 버팀하중의 비교분석

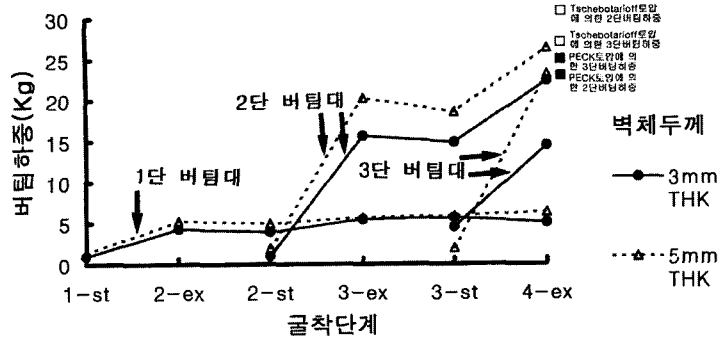
흙막이 구조설계를 위한 버팀하중의 결정은 흙막이 구조의 안전에 중요한 요소로 본 모형실험에서 하중계에 의해 측정된 버팀하중과 Terzaghi-Peck(1969) 및 Tschebotarioff (1973)의 경험토압으로부터 산출된 버팀 하중을 비교하여 그림 4.3에 나타내었다.

그림 4.3에서 1단 버팀 하중의 경우 Peck과 Tschebotarioff의 경험토압에서 산정된 버팀 하중보다 적은 값을 나타내었고, 2단과 3단 버팀 하중의 경우, 측정된 버팀 하중 값이 Peck토압에서 산정된 버팀 하중과 거의 일치하는 값을 나타내고 있다. 특히 3단 버팀 하중의 경우 모든 지반의 경우 거의 일치되는 값을 나타내었다. 2단 버팀에서 Tschebotarioff 토압에서 산정된 버팀 하중은 지반조건에 관계없이 계측치와 Peck하중보다 약간 크게 산정되고 있다. 따라서 측정된 버팀 하중은 경험토압에 의하여 산출되는 Peck이나 Tschebotarioff 방법의 결과와 매우 유사함을 알 수 있었다.

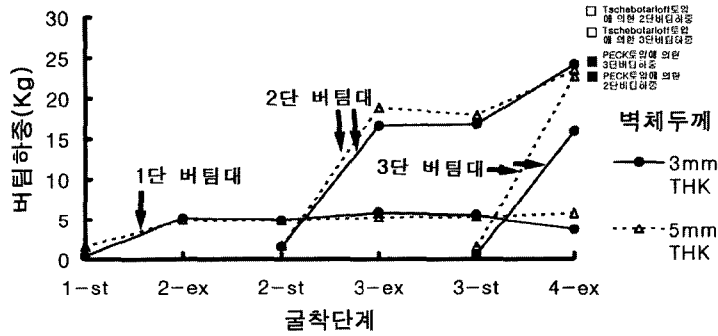
4.2.3 굴착단계별 버팀하중의 변화

굴착단계에 따른 버팀 하중의 변화를 분석해 보면, 그림 4.3에서 1단 버팀대의 경우 지반조건 및 굴착단계에 관계없이 2단 굴착시 버팀 하중이 5kg 내외로 증가하였고, 이후 일정한 값을 유지하고 있다.

2단 버팀대의 경우에는 다음단계 굴착시 버팀 하중이 급격히 증가하였는데, C지반($\gamma=1.38 \text{ t/m}^3$)에서 벽체두께가 3mm일 경우 최종버팀하중의



(a) A 지반 ($\gamma = 1.43 \text{ t/m}^3$)



(b) C 지반 ($\gamma = 1.38 \text{ t/m}^3$)

그림 4.3 구착단계별 모형실험의 버팀 하중과 경험도압에 의한 버팀하중의 변화비교(Peck 및 Tschbotarioff 경험도압에 의한 버팀하중과의 비교)

67%, 5mm 경우 80%까지 증가하였고, A지반 ($\gamma=1.43 \text{ t/m}^3$)에서 벽체두께 3mm일 경우 76%, 5mm 경우 70%까지 증가하였다.

3단 버팀대의 경우에는 버팀대 설치후 다음단계 구착시에 벽체두께 5mm는 최종단계의 2단 버팀 하중의 크기까지 증가하는 경향을 보였고, 벽체두께 3mm의 경우는 2단 버팀 하중의 초기 증가량과 비슷한 크기를 보였다.

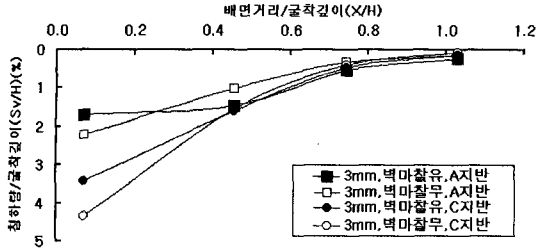
4.2.4 배면지반의 지표 침하량과 벽체의 수평변위량 분석

구착에 따른 벽체 수평변위는 배면지반 지표침

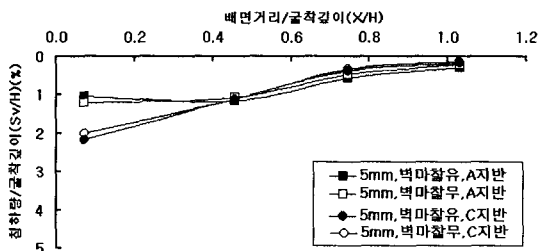
하를 유발시켜 인접구조물에 위대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 벽체변위와 지반침하와의 관계를 보다 정확히 규명함으로써 인접구조물의 거동을 예측하여 피해여부를 판단할 수 있다. 모형실험 결과중 벽체수평변위와 지표침하량에 대하여 비교분석하였다,

1) 배면지반의 지표침하량

단계별 구착에 따른 배면지반의 지표침하량은 지반조건, 벽체의 강성, 버팀 방법 등의 영향을 받게 되며 각 지반조건별 모형실험결과를 그림 4.4에 나타내었다.



(a) 벽체두께 3mm



(b) 벽체두께 5mm

그림 4.4 지반조건별 지표침하량

그림 4.4는 지반조건이 느슨한 지반일수록, 벽체 강성이 작을수록 지표침하율이 크게 나타남을

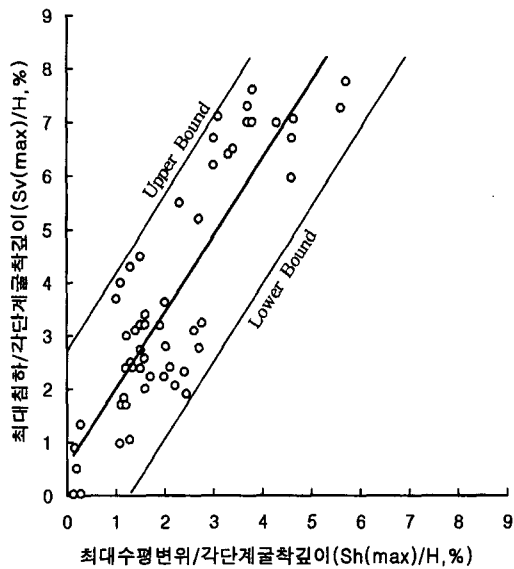


그림 4.5 수평변위율에 대한 지표침하율

보여주고 있다. C지반인 경우 벽체 두께가 3mm 일 때 최종굴착깊이의 4.5%에 해당하는 침하가 발생하였으나 벽체가 5mm인 경우에는 2.0%의 침하가 발생하였고, A지반인 경우에는 벽체가 3mm 일 때 최종굴착깊이의 2.5%, 벽체가 5mm일 때 1.0%의 침하가 발생하여 조밀한 지반이고 벽체 강성이 증가할수록 굴착깊이에 대한 침하비율이 적음을 알 수 있다. 이는 벽체의 강성이 증가됨으로서 벽체의 수평변위가 억제되고 이로 인하여 지표침하의 감소를 나타내었기 때문이다.

Peck의 지반조건별 침하도표와 Bauer의 사질 토지반에 대한 침하추정량과 비교하면 굴착깊이 (H)의 1.0%이내이나 실험결과에서는 지반조건 및 벽체두께에 따라 최대침하량이 굴착깊이의 2%~4%로 실험결과치가 기존의 연구결과보다 크게 발생하였다. 이는 실험중 발생한 1~2%의 지반손실로 그 원인은 실험지반의 조성상태가 비교적 느슨한 지반이기 때문에 실험중 충격이나 부주의 등으로 토립자의 재배열에 의한 영향인 것으로 사료된다.

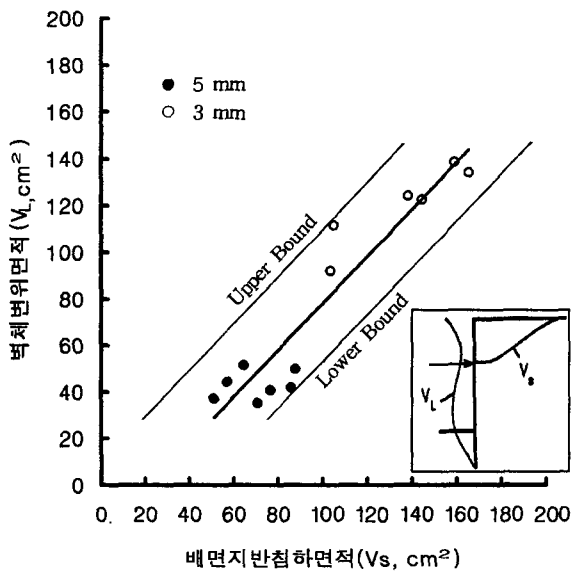
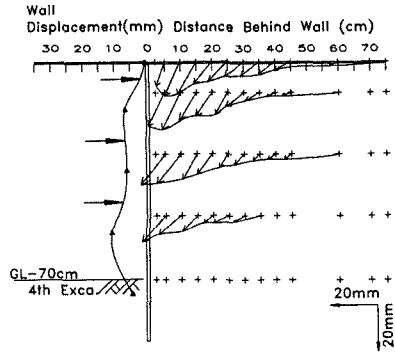
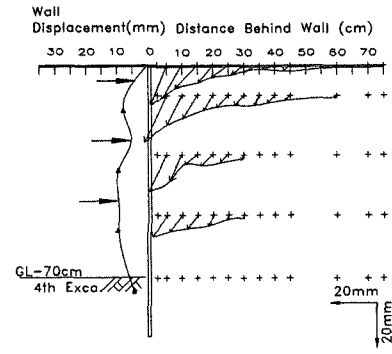


그림 4.6 벽체변위면적과 지반침하면적의 비교

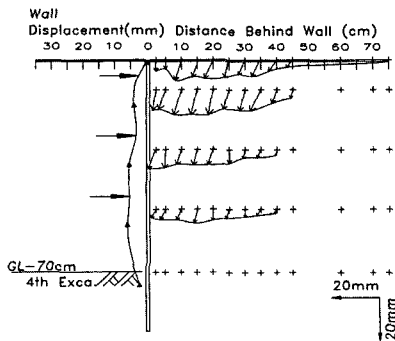


(a) 벽마찰이 있는 경우

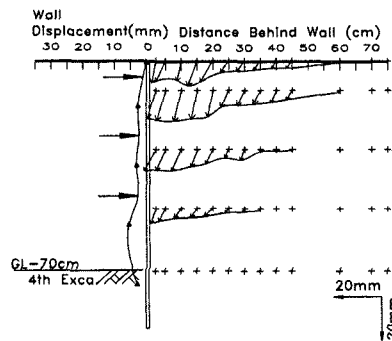


(b) 벽마찰이 없는 경우

그림 4.7 3mm 벽체의 지중변위 분포도(최종굴착시)

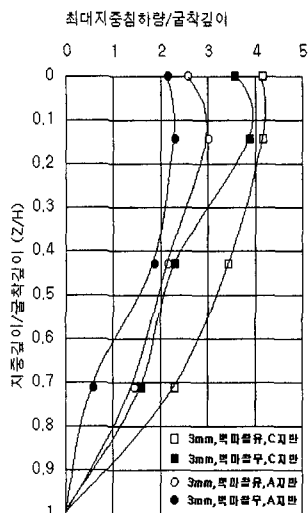


(a) 벽마찰이 있는 경우

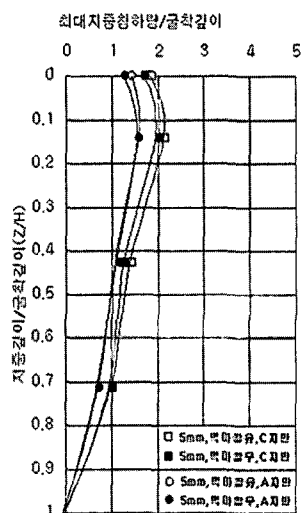


(b) 벽마찰이 없는 경우

그림 4.8 5mm 벽체의 지중변위 분포도(최종굴착시)



(a) 3mm 벽체



(b) 5mm 벽체

그림 4.9 심도비와 최대지중침하비의 관계

2) 벽체 수평변위와 지표침하의 상관관계 분석

흙막이 벽체의 수평변위는 배면지반의 지표침하와 밀접한 관계가 있음은 수많은 연구를 통하여 알려져 왔다. 배면지반 침하의 경우 실제시공 현장에서는 흙막이 벽체의 수평변위, 상재하중, 굴착단면의 크기, 벽체의 강성, 선행하중 등 각종 원인에 의하여 발생될 수 있다.

본 연구의 모형실험에서는 상기조건 중 흙막이 벽체의 수평변위 및 사질토지반의 압축침하에 의한 지반침하의 상관관계를 규명하고자 실험결과에 대한 분석을 실시하였으며 그림 4.5에서 굴착깊이에 대한 지표침하율 및 벽체변형률을 상호 비교하였다.

본 연구의 모형실험에서 사용된 지반은 균질하고 느슨한 사질토 지반이고 지하수는 고려되지 않았다. 그림 4.5에서 지반조건 및 벽체강성에 따른 전체 굴착단계별 벽체변형률과 지표침하율에 대하여 분석한 것으로 전체적으로 지표침하율이 벽체변형률보다 1.44배 큰 것으로 나타났다. 이 결과에서 벽체변형에 의한 사질토지반의 압축침하에 의한 지표침하가 0.44의 비를 나타내었다. 벽체변형률에 대한 지표침하율의 상,하한계범위를 고려한 상관관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = 1.44X \pm 2.2$$

여기서, X : 벽체수평변형률,

Y : 최대침하율

벽체강성 및 지반조건별 벽체수평변위와 지표침하에 대한 면적을 구하여 비교한 결과 그림 4.6과 같이 벽체수평변위면적과 지표침하량면적이 동일함을 알 수 있으며 상관관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Y = 1.0X \pm 17$$

여기서, Y : 벽체 수평변위면적(cm^2),

X : 배면지반 침하면적(cm^2)

그림 4.6에서 벽체 수평변위면적 100.0 cm^2 에 배면지반침하면적 122.6 cm^2 이 발생하여 22.6 cm^2 는 실험중 발생한 배면지반의 손실 및 입자재배열에 의한 압축침하에 의한 것으로 사료된다. 이 결과로 벽체수평변위에 의한 지표침하의 추정보다는 벽체변위면적을 고려한 지표침하 추정이 타당한 것으로 사료되며, 기존의 반경험적인 Caspe방법 및 Bowels의 방법이 타당성 있음을 알 수 있다.

4.2.5 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 다단계 지반굴착에 따른 지중변위의 측정을 실시하여 그 결과를 나타내면 그림 4.7 및 4.8과 같다.

최대지중변위량은 벽체의 강성에 따라서 감소하는 경향을 나타내었으며, 지중변위의 영향범위는 벽마찰의 영향으로 벽마찰이 있는 경우 심도가 깊어짐에 따라서 영향범위는 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한 침하분포곡선에서도 벽마찰이 있는 경우 침하분포곡선은 포물선의 형태를 나타내는 반면 벽마찰이 없는 경우는 Peck이 제안한 지반조건별 침하분포곡선과 유사한 형태를 나타내었다. 따라서 지표침하 및 지중변위는 벽체강성 및 벽마찰의 유무에 따라서 영향을 받음을 알 수 있었다.

그림 4.9는 지중심도에 대한 최대지중변위비의 관계를 나타내었다. 이 결과에서 최대지중변위의 발생심도는 심도비 0.1H에서 0.15H(H는 최종굴착심도)의 범위에서 나타났으며, 최대침하비 역시 심도비 0.0의 지표침하와 비교하여 심도비 0.15H에서 최대 지중변위를 나타내고 있음을 알 수 있

있다. 이는 도심지 기반굴착에 있어서 지중매설물이 있는 경우 지표침하 및 지중변위를 추정하기 위해서는 지중매설물의 위치 및 인접구조물의 기초심도를 고려하여야 하며, 인접구조물에 대한 영향평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 모형실험에 대한 수치해석 검토

5.1 벽체변위와 토압분포 분석

본 연구에서 수행한 모형실험의 벽체변위와 토압분포를 수치해석으로 비교분석하기 위하여 기존 탄소정보법 프로그램인 SUNEX(version 3.1) 프로그램을 사용하였다. 수치해석을 위한 해석조건 및 탄소정보법 프로그램에 대한 입력 지반물성치는 표 5.1과 표 5.2와 같다.

해석에 적용된 토압은 기존 탄소정보법 프로그램에서 적용하고 있는 벽체변위를 고려한 탄소정보법에 의한 토압과 Peck의 경험토압을 적용하였

표 5.1 탄소정보법 프로그램에 의한 해석조건

이론검증	벽체 두께	지반 조건
1	5mm	A 지반 ($\gamma=1.43\text{t/m}^3$)
2		C 지반 ($\gamma=1.38\text{t/m}^3$)
3	3mm	A 지반 ($\gamma=1.43\text{t/m}^3$)
4		C 지반 ($\gamma=1.38\text{t/m}^3$)

표 5.2 이론검증에 사용된 지반 물성치

이론검증	단위(t/m^3)	내부마찰각 ($^\circ$)	점착력 (t/m^2)	지반반력계수 (t/m^3)
1	1.43	36	0.0	2,600
2	1.38	32	0.0	2,600
3	1.43	36	0.0	2,600
4	1.38	32	0.0	2,600

으며, 본 모형실험 연구에서 측정된 실측토압 및 벽체 수평변위에 대하여 해석결과와 비교하였다.

5.1.1 토압분포에 대한 비교분석

3mm 두께 벽체에 대하여 수치해석결과 나타난 토압 분포 및 수평변위와 모형실험에 의한 실측토압은 그림 5.1과 같다.

그림 5.1에서 나타난 바와 같이 토류벽체의 다단 굴착에 따른 토압 분포에서 Bjerrum (1972)등이 제안한 아칭효과(arching effect)를 확인 할 수 있었으며, 반면에 기존 탄소정보법 프로그램의 경우 탄소정보법에 의한 토압 또는 Peck의 경험토압은 심도에 따라 선형적으로 증가되는 일정한 토압분포를 적용하고 있어 벽체변위 형태 및 토압분포가 모형실험 결과와 차이를 나타내고 있다.

벽체상부에서는 실측토압이 탄소정보법에 의한 토압이나 Peck의 경험토압보다 크고, 굴착면 부근에서는 탄소정보법에 의한 토압보다 약간 작고 Peck의 경험토압보다 큰 결과를 나타내었다. 이는 그림 5.2에 나타낸 5mm 벽체의 경우도 동일한 결과를 나타내고 있으며, 벽체의 강성이 감소됨에 따라 아칭효과(arching effect)는 더욱 증가함을 알 수 있었다.

5.1.2 벽체의 수평변위에 대한 비교분석

측정된 토압분포와 벽체 수평변위에 대하여 수치해석의 결과와 비교하면 그림 5.2는 벽체 두께

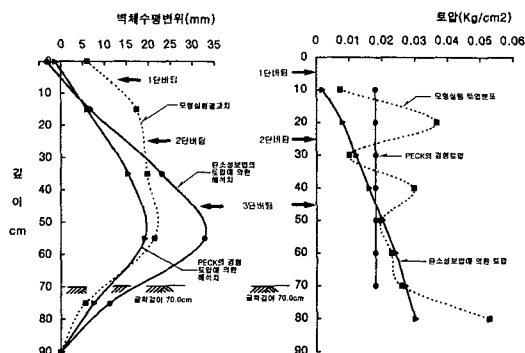
가 5mm인 경우로 Peck토압에 의한 벽체의 수평 변위는 측정된 수평변위 보다 벽체 상부에서 다소 작게 나타났으나, 하부에서는 거의 일치하고 있다. 탄소정보법에 의한 토압의 경우 벽체의 상부 변위는 측정치 보다 작고, 하부 변위는 크게 나타났다. 이는 벽체의 상대적인 수평변위의 차이에 의해 토압의 분포형태도 상대적인 차이를 나타내고 있다.

벽체두께가 5mm로 증가됨에 따른 벽체 변위는 Peck의 경험토압에 의한 벽체 변위와 측정된 벽체의 수평변위는 벽체 두께가 3mm인 경우와 같이 하부에서 잘 일치하고 있으며, 탄소정보법에 의한 토압의 경우는 모형실험에서 측정된 벽체 수평변위와 큰 차이를 나타내고 있다

측정된 벽체하부의 토압 분포가 탄소정보법에 의한 토압과 같이 증가되는 것이 아니고, 벽체하부의 변위 증가로 토압이 감소하여 Peck의 경험 토압과 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 연성 토류벽체에 의한 다단계 굴착공법을 적용하는 경우 아칭효과에 따른 토압의 재분배를 고려하여 토류 구조 및 버팀지지체에 대한 안전성 평가가 이루어져야 할 것이다.

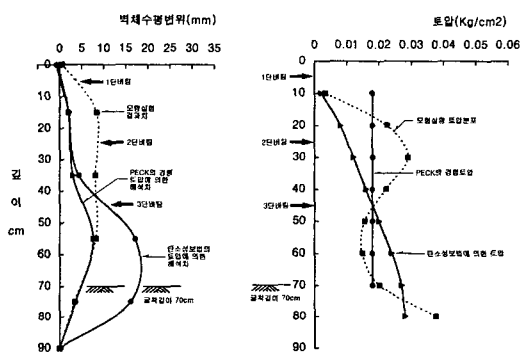
5.2 지표침하와 지중변위 분석

모형실험 결과 중 지표침하와 지중변위에 대하여 수치해석을 실시하기 위하여 GDHM재료모형을 적용한 유한요소해석을 실시하였다. 적용된 재료모형은 Duncan과 Chang에 의하여 제안된 쌍곡선 재료모형(hyperbolic model)을 일반화시킨 GDHM (Generalized Decoupled Hyperbolic Model) 모형을 적용하여 지중변위에 대한 이론검증을 실시하였다. GDHM재료모형이 적용된 유한요소 프로그램은 체적변형과 응력변형관계는 독립적인 관계를 나타내며, 주어진 평균압력하에서 일정한 응력경로의 팽면체전단응력과 전단변형의 관계는 쌍곡선의 형태를 이루는 비선형성을 나타내는 것으로 가정하였으



a) C 지반 조건 (1.38 t/m³ , 3mm 벽체)

그림 5.1 모형실험에 대한 탄소성 해석결과 I



b) A 지반 조건 (1.43 t/m³ , 5mm 벽체)

그림 5.2 모형실험에 대한 탄소성 해석결과 II

며, 이와 같은 가정하에서 일반화된 전단강도 방정식은 다음과 같다.

$$G = G_i \left[1 - R_f \frac{\tau_{oct}}{\tau_{oct,ult}} \right]^2$$

여기서 G는 전단계수, G_i는 정하중상태에서의 초기전단계수, τ_{oct}는 팽면체응력상의 전단응력, τ_{oct,ult}는 팽면체응력상의 극한전단응력을 의미하며, GDHM 재료모형에 대한 연구는 참고문헌 4에서 상세히 기술되어 있으므로 참조하시기 바란다. 또한 지반과 벽체의 벽마찰각을 고려하기 위하여 절점요소(joint element)를 적용하여 모형실험결

과와 수치해석결과를 상호비교 분석하였다.

5.2.1 수치해석을 위한 입력치

해석에 적용된 시험지반 물성치와 GDHM재료 모델에 대한 입력치 및 지반과 벽체의 벽마찰에 대한 절점요소의 입력치는 표 5.3과 같으며, 측압계수는 Jaky의 $1 - \sin\phi$ 로 산정하여 적용하였다.

5.2.2 수치해석과 모형실험 결과의 비교분석

모형실험결과를 그림 4.8과 4.9에 나타내었으며, 벽체수평변위 및 지중변위에 대한 유한요소 해석결과는 그림 5.3과 5.4와 같다. 벽체변위 결과는 그림 4.8의 벽체두께 3mm의 모형실험 결과와 비교하여 전반적으로 벽체변위는 적은 결과를 나타내었고, 모형실험에서는 벽체하부의 변위가 큰 반면에 수치해석결과에서는 상부의 변위가 큰 것으로 나타났고, 벽체두께 5mm의 경우는 그림 4.9의 모형실험 결과와 비교하면 전체적으로 벽체의 형태는 유사하였으며, 모형실험결과에서 벽체하부의 변위가 큰 반면 해석결과에서는 벽체상부의 변위가 상대적으로 다소 큰 값을 나타내었다.

지중변위의 결과를 그림 5.3과 5.4에 나타내었

으며, 지중변위 분포는 벽체강성에 따라서 3mm 벽체가 5mm 벽체에 비하여 다소 큰 값을 나타내었고, 지중변위의 영향범위는 굴착심도 1.0H이상으로 나타났으며, 벽체강성이 3mm에서 5mm로 증가함에 따라 최대지중변위는 감소하여 지중변위의 분포가 일정하게 나타났다. 또한 최대지중침하의 경우도 모형실험결과와 유사하게 지표면이 아닌 심도비 0.15H의 범위에서 나타났다. 이는 그림 5.7과 5.8에서도 알 수 있듯이 벽체강성이 증가하므로서 배면지반의 변위를 억제하여 지표침하 및 지중변위의 분포가 일정한 분포를 나타냄을 알 수 있다.

모형실험결과와 수치해석결과에 대하여 지표침하비 및 침하분포형태는 그림 5.5와 그림 5.6에 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 지표침하비는 3mm 벽체의 경우 모형실험결과에서 최대지표침하비가 3.5%, 수치해석결과는 2.2%를 나타내어 해석결과가 모형실험결과보다 1.3%의 다소 작은 침하비를 나타내었으나 모형실험중의 지반손실을 고려하면 일치하는 결과를 얻었으며, 그리고 침하분포형태는 모형실험결과와 해석결과가 유사한 양상을 나타내고 있다. 또한 벽체강성에 따른 지표침하 분포형태는 벽체강성이 증가함에 따

표 5.3 유한요소 이론검증에 적용된 입력물성치

	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아손비	측압계수	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m ²)
시험지반물성치	1.430	2.143×10 ³	0.35	0.41	36°	0
지반-벽체의 절점요소 물성치	1.430	2.143×10 ³	0.35	0.41	36°	0
					0°	
	탄성계수 (t/m ²)	단면2차 모멘트 (m ⁴ /m)	포아손비	벽체단면적 (m ² /m)	벽체두께 (m)	벽체높이 (m)
시험벽체 물성치	2.56×10 ⁵	2.25×10 ⁻⁹	0.3	0.003	0.003	0.9
		10.42×10 ⁻⁹		0.005	0.005	

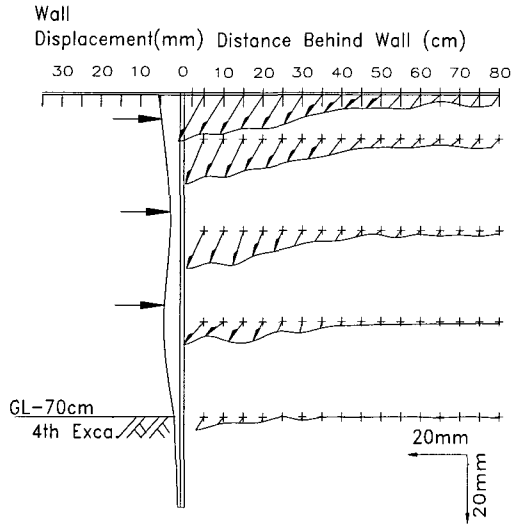


그림 5.3 3mm벽체의 수치해석결과

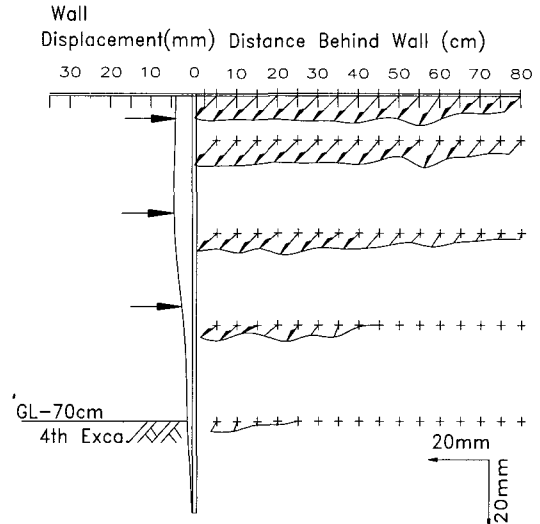


그림 5.4 5mm벽체의 수치해석결과

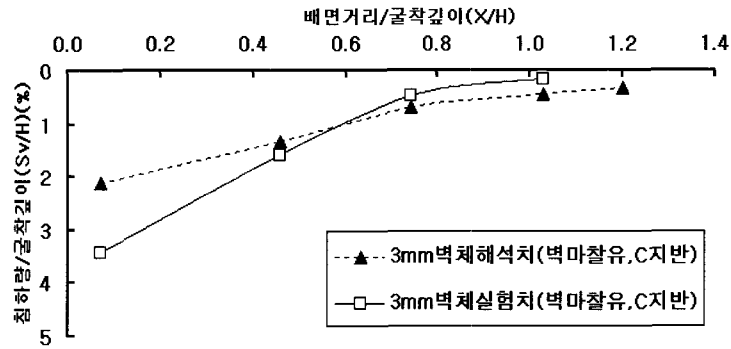


그림 5.5 3mm 벽체해석결과 지표침하 비교(벽마찰유, C지반)

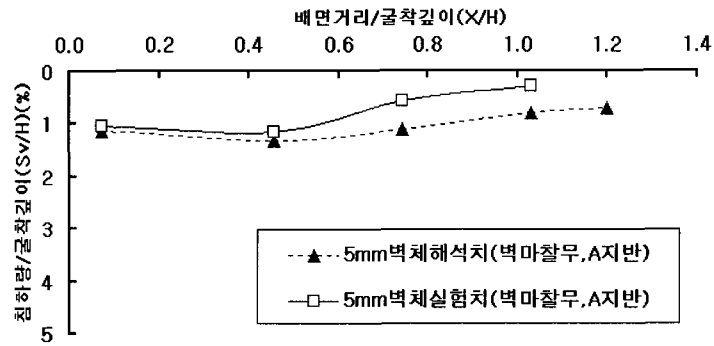


그림 5.6 5mm 벽체해석결과 지표침하 비교(벽마찰무, C지반)

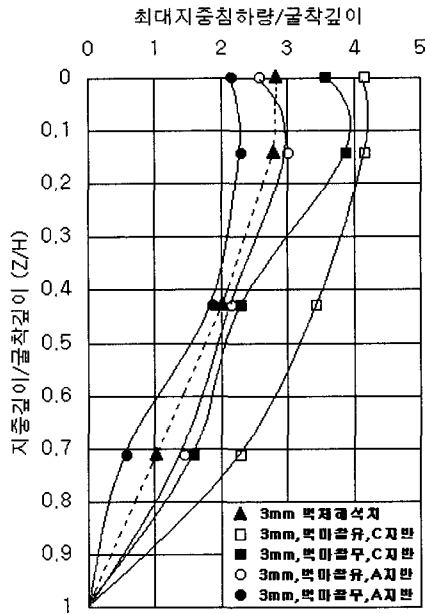


그림 5.7 3mm벽체 지중침하량 해석결과

라 벽체변위가 억제되어 지표침하량 및 지표침하 분포형태가 상이하게 나타남을 알 수 있었다.

심도비에 따른 지중침하비에 대한 모형실험결과와 해석결과를 그림 5.7과 5.8에 나타내었다. 이 결과에서는 3mm 및 5mm 벽체에 대한 수치해석 결과의 경우 심도비에 따른 지중침하비가 모형실험 결과와 유사한 결과를 얻었으나, 최대지중침하비는 심도비 0.15H(H:최종굴착심도)에서 나타나지는 않았다. 향후 이에 더 많은 수치해석을 통하여 보완되어야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 도심지 깊은 굴착에 의한 흙막이 벽체와 배면지반의 거동을 규명하기 위하여 모래지반에서 단단계 굴착모형 실험을 수행하여 단단계 굴착으로 인한 벽체의 수평변위, 굴착에 따른 단계별 토압 변화와 분포, 배면지반의 지표침하

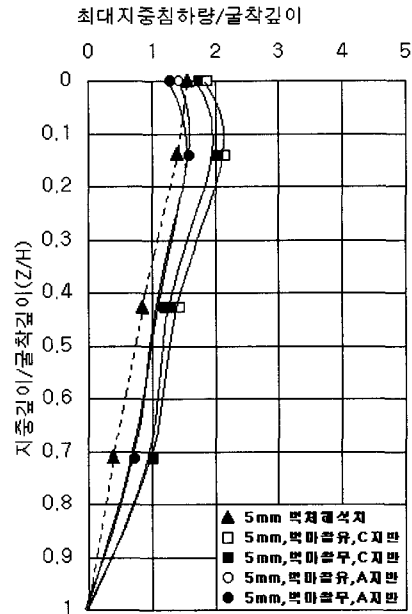


그림 5.8 5mm 벽체 지중침하량 해석결과

및 지중변위를 측정하였고, 그 결과를 기존 탄소성모형 프로그램 및 본 연구자에 의해 개발된 GDHM재료모형을 이용한 유한요소법 프로그램으로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 토압분포를 벽체 강성에 따라 분석한 결과 강성이 작은 벽체두께 3mm의 경우 국부적인 벽체 변형에 의하여 토압이 국부적으로 증가한 반면, 벽체두께 5mm에서는 굴착심도비 0.2H에서 0.5H의 범위에서 토압이 증가되는 경향을 보이고 있어, 배면지반의 토압 재분배 현상인 아칭 효과는 벽체의 강성과 직접적인 관계가 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 1단 버팀하중의 경우 실측 버팀하중 값이 Peck 및 Tschobotarioff 토압에 의한 버팀 하중보다 작게 나타났고 2, 3단 버팀 하중의 경우 거의 일치되는 값을 나타내었다. 따라서 본 실험에서 측정된 버팀 하중으로 산출한 2단 및 3단의 토

압은 Peck 및 Tschebotarioff의 경험토압과 유사한 토압분포를 나타내었다.

- 3) 벽체변위와 토압의 상호관계를 고려한 기존 탄소성보법 프로그램의 경우에는 앵커지지 시스템에서 선행하중의 적용시에만 다소의 아칭효과로 인한 토압 재분배가 고려되어 있다. 그러나 본 모형실험과 같이 선행하중이 적용되지 않은 연성벽체에 의한 다단계 굴착을 실시하는 경우에도 아칭효과에 의한 토압 재분배가 이루어지므로 보다 많은 현장계측 자료를 분석, 평가하여 기존 탄소성보법 프로그램에 벽체변위에 의한 아칭효과를 고려하여 토압 재분배에 대한 적용이 이루어져야 할 것으로 사료된다.
- 4) 벽체수평변위 면적과 지표침하 면적에 대한 모형실험 결과는 서로 일치하고 있어 벽체의 수평변위의 측정결과를 이용하여 지표면 침하를 추정하는 기존의 경험 및 반경험적 방법에 타당성이 있음을 확인하였으나, 벽체강성 및 벽체와 배면지반의 벽마찰각에 유무에 따른 지표침하 형태는 다소 차이를 나타내어 벽체변위의 형태 및 벽체와 지반의 마찰을 고려하여 지표침하를 판단하여야 할 것이다.
- 5) 모형실험결과 최대지중변위의 발생심도는 0.1H에서 0.15H(H는 최종굴착심도)의 범위에서 나타났으며, 최대침하비 역시 지표침하와 비교하여 심도비 0.15H에서 최대 지중변위를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 따라서 굴착배면 측에 상재하중이 없는 사질토지반에서의 버텨 굴착시, 벽체상부의 변위가 상당히 억제되어 아칭효과가 뚜렷하게 나타날 것으로 판단되는 경우 지중매설물의 위치 및 인접구조물의 기초심도를 고려하여 지표침하 및 지중변위를 추정하여야 하며, 토류벽체 및 인접구조물에 대한 영향평기도 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 6) GDHM재료모형을 적용한 유한요소법 프로그램에 의한 수치해석 결과 벽체수평변위의 형태

는 다소 상이한 결과를 얻었으나 배면지반의 지중변위 분포는 벽체강성에 따라서 유사한 결과를 얻었다. 또한 절점요소를 고려하여 벽체 및 지반의 벽마찰을 고려한 해석결과 지중변위의 분포형태 및 지중변위에 의한 배면지반의 영향을 추정할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김학문, 홍원표(1991), 흙막이 구조물(I), 한국지반공학회지 7권3호, pp. 111-127.
2. 양구승(1996), 도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 관한 분석, 서울대 박사학위 논문
3. 이봉열, 김학문, 이종규(1992), "흙막이벽의 계측과 설계토압고찰", 한국지반공학회 지반굴착위원회 학술발표집 제 1 집, pp
4. 이봉열, 김학문, 김광진(1997), "도심지 굴착에 따른 토류구조물 및 인접지반의 유한요소 해석기법", 한국지반공학회지 제 13 권 제 5 호, pp35-44.
5. Anderson, W. F. et al(1982), "Laboratory-scale tests on anchored retaining walls supporting backfill with surface loading" Canadian Geotechnical Journal. Vol. 19, pp 213-224
6. Bowles, J. Enderson(1996), Foundation analysis and design, McGraw-Hill Press, Fifth Edition, pp 791 - 811.
7. Bransby, P. L. & Milligan, G. W. E.(1975), "Soil Deformations Near Cantilever Sheet Pile Walls", Geotechnique 25, No 2, pp. 175~195.
8. C.R.I. Clayton et al.(1993), "Earth pressure and earth-retaining structures", Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 2th Edition
9. Clough, G.W.(1975), "Deep Excavations and Retaining Structures.", Proceedings of the Short Course-Seminar on Analysis and Design of Building Foundations, Pennsylvania, pp.417~465
10. Fang, Y.S. & Ishibashi, I.(1986), "Static Earth Pressure with Various Wall Movement", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 112, No. GT3, March, pp. 317~333.
11. Hanna, T.H. & Kurdi, I.I.(1974), "Studies on Anchored Flexible Retaining Walls in Sand", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT10, Oct., pp. 1091~1106.
12. Hansen, J. Brinch(1953), "Earth pressure calculation, The Danish Technical Press, Institution of

- Danish Civil Engineers, Copenhagen. pp 23~56.
13. Jagdish Narain et al(1969). "Model Study of Pressure in Sand" ASCE, Vol.95, pp 969~983.
 14. L. Bjerum et al.(1972), "Earth pressure on flexible structures : A state-of-the-Art Report", 5th European conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Madrid, Vol 2. pp169-196
 15. Mana, A.I. and Clough, G.W.(1971), "Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay", ASCE, Vol. 107, No. GT6, June, pp 759~777
 16. O'Rourke, T. D.(1981), "Ground movements caused b braced excavation", ASCE, Vol. 107, No. GT9, pp. 1159~1178
 17. Peck, R. B.(1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground, Proc. of 7th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico, Vol. 4, pp 259~290.
 18. Potts, D. M. & Fourie, A.B.(1984), "The Behavior of Wall Stiffness on the Behavior of a Propped Retaining Wall", Geotechnique, Vol. 34, No3, pp. 383~404.
 19. Potts, D. M. & Fourie, A.B.(1985), "The Effect of Wall Stiffness on the Behavior of Propped Retaining Wall", Geotechnique, Vol. 35, No. 3, pp. 347~352.
 20. Prakash, S et al(1979), Analysis and design of foundation and retaining structures, Sarita Prakashan Press, New Delhi, pp121-184, pp 590~617, pp 648~668.
 21. Sherif, M.A. et al.(1982), "Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT5, May, pp. 679~695.
 22. Sherif, M.A. Fang.(1984), "KA and KO Behind Rotating and Non-Yielding Walls", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 110, No. 1, pp. 41~57.
 23. Taylor, R. K. & Attewall, P.B.(1984), "Ground Movements and Their Effects on Structures", Blackie & Son Ltd, pp. 76 ~109.
 24. Terzaghi, K. & Peck, R.B.(1967), Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., WIE, pp. 202~206, pp. 394~413.

(접수일자 1999. 6. 14)