

Diaphragm Wall에서 굴착깊이-시간-변위에 관한 원심모형실험

Centrifuge Model Tests on Excavation Depth-Time-Displacement of Unpropped Diaphragm Walls

이 처 근*¹ Lee, Cheo-Keun

안 광 국*² Aan, Kwang-Kuk

허 열*³ Heo, Yol

Abstract

In this study, the behavior of unpropped diaphragm walls in decomposed granite soil was investigated through centrifuge model tests considering embedment ratio, groundwater level and excavation conditions(continuous and step excavation). Excavation during the centrifuge tests was simulated by operating a solenoid valve that allowed the zinc chloride solution to drain from the excavation and ground deformation, wall displacement and bending moment were measured with time. From the test results, as the depth of embedment increased, the bending moments increased, while the decreasing rate of pore water pressure in the retained side during excavation decreased. It was shown that settlement at the final step of excavation considering time lapse was 5~7% of in the process of excavation. As a result of normalizing maximum surface settlement and wall displacement by excavation depth, maximum settlement by excavation existed between 0.8 and 1.2(average 0.91) times of wall displacement. The relation between the normalized wall displacement and embedment ratio by excavation depth was proposed as a exponential function. Failure line was straight line type, the ground of retained side inside failure line had downward displacement to the direction of the wall and finally the failure was made by the rotation of the wall. The angle of failure line was about 66~72.5°, greater than calculated value.

요 지

본 연구에서는 화강토 지반상의 자립식 diaphragm wall의 거동을 연구하기 위하여 벽체의 근입깊이비, 지하수위 및 굴착 조건(연속 및 단계굴착)을 변화시키면서 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형실험시 지반굴착은 흙과 동일한 밀도로 혼합된 zinc chloride 용액이 배수되도록 밸브를 조작하여 실시하였으며, 굴착에 의해 발생하는 지반의 변형과 벽체의 변위 및 휨모멘트를 시간경과에 따라 측정하였다. 실험결과, 벽체의 근입깊이비가 증가함에 따라 벽체의 휨모멘트는 증가하는 반면, 굴착과정동안 배면측에서의 간극수압 감소속도는 감소하였다. 최종 굴착단계에서 굴착후 시간경과에 따른 침하량은 굴착과정중의 침하량에 비해 5~7% 정도를 나타내었다. 최대 표면침하량과 벽체변위를 굴착깊이로 정규화한 결과 최대 침하량은 벽체 변위량의 0.8~1.2배(평균 0.91배) 사이에 분포하였다. 굴착깊이로 정규화한 벽체변위와 근입깊이비의 관계는 지수함수식으로 제안하였다. 파괴면은 직선적인 형태로 파괴면내의 배면측 지반은 벽체를 향하여 하향의 변위를 일으키면서 벽체의 회전에 의해 파괴되었으며, 파괴면의 각도는 66~72.5° 정도로 이론적인 파괴면의 각도보다 크게 평가되었다.

Keywords : Diaphragm wall, Excavation, Embedment ratio, Centrifuge model test

*1 정희원, 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 정희원, Illinois Institute of Technology 토목공학과 박사 과정

*3 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

급속한 경제발전과 도시화로 인하여 도시지역에서 좁은 부지의 효율적인 활용 측면에서 지하공간을 확보하기 위한 흙막이 구조물공사가 빈번히 시행되고 있다. 이러한 흙막이 벽체의 사용에 있어 흙막이구조물 자체의 안정뿐만 아니라 굴착에 따른 지하수위 저하와 지반침하나 벽체의 이동에 따라 인근 구조물에 큰 영향을 미치지 않는 흙막이 벽체의 설계 및 시공관리가 요구된다. 또한, 흙막이 구조물공사가 대형화·도심화되면서 도심지 및 민원이 발생할 수 있는 지역에서 저소음 저진동의 흙막이공법의 중요성이 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 흙막이 구조물로 벽체강성이 비교적 클 뿐만 아니라 소음·진동이 적은 저공해공법으로 diaphragm wall의 사용이 증가하고 있는 실정이다. 외국에서는 실내모형실험, 현장사례 연구와 해석적 방법을 통하여 diaphragm wall의 거동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만(Tedd 등, 1984; Bolton & Powrie, 1988; Fourie & Potts, 1989; Powrie & Li, 1991; King & McLoughlin, 1993; Bolton & Stewart, 1994; Powrie, 1986, 1996; Gourvenec 등, 1999; Ng 등, 1999; Poh 등, 1999), 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

토류구조물의 거동에 관한 실험적 연구는 현장의 원형 구조물 또는 실내축소모형을 사용하고 있다. 현장실물실험의 경우는 구조물의 거동을 정확히 파악할 수 있으나 다양한 실험조건에 대한 영향을 조사하기에 경제적 어려움이 있다. 한편, 기존의 실내모형실험은 원형과의 상사성 만족여부와 비선형적인 흙의 거동과 관련하여 실험결과와 신뢰성에 대하여 의문을 지니게 된다. 따라서, 축소된 모형에 인위적으로 원심력을 작용시켜 소형모형 내에 실지반의 응력상태를 재현시킬 수 있는 원심모형실험기법의 사용이 추천되고 있다.

표 1. 본 실험에 사용한 화강토의 물리적 특성

| Physical properties | Quantity |
|---------------------------------------------|----------|
| Specific gravity | 2.66 |
| Percent passing through the No 200 sieve(%) | 6.40 |
| Plasticity index(%) | NP |
| Unified soil classification system | SW-SM |
| Maximum dry unit weight(t/m ³) | 1.79 |
| Optimum moisture content(%) | 14.9 |

본 연구에서는 화강토 지반상의 자립식 diaphragm wall의 거동, 즉 지반굴착에 따른 벽체의 변위 및 휨모멘트와 지반의 변형특성을 연구하기 위하여 벽체의 근입깊이, 지하수위 및 굴착조건(연속 및 단계굴착)을 변화시키면서 원심모형실험을 수행하였으며, 굴착 후 시간에 따른 벽체의 거동을 규명하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시료의 물성치

본 실험에서 모형지반 형성재료로 사용한 시료는 화강토로 실내에서 공기 건조시킨 후 #4번 체를 통과한 시료를 사용하였으며, 표 1과 같은 물성치를 갖는다. 시료에 대한 체분석 결과 그림 1에 나타낸 바와 같이 균등계수는 6.2이고, 곡률계수는 1.2로 입도분포가 양호하며, 통일분류법으로 SW-SM으로 분류된다.

그림 2는 최대전조단위중량의 95%로 성형하여 실시한 삼축압축시험 결과 p-q 곡선을 나타낸 것으로 0.5~2kg/cm²의 구속압력에서 전단저항각은 38.5°, 점착력은 0.1kg/cm²로 평가되었으며, 그림 3은 축차응력과 축변형률의 관계를 나타낸 것으로 최대 축차응력은 약 4~7%의 축변형률에서 발생함을 알 수 있다.

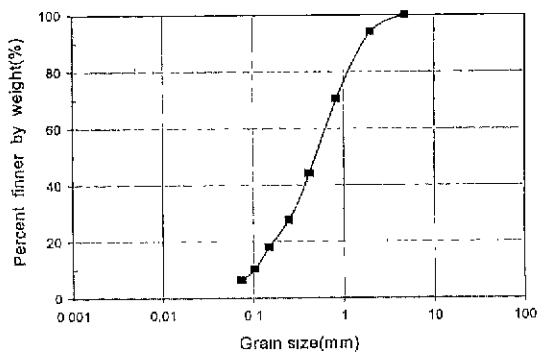


그림 1. 화강토의 입도분포곡선

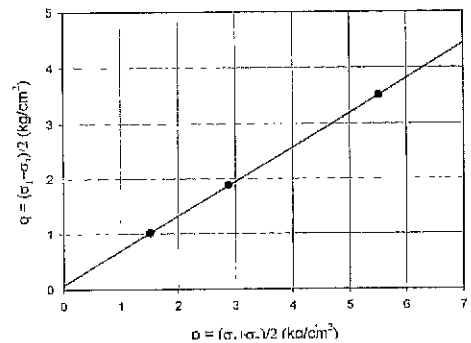


그림 2. p-q 곡선

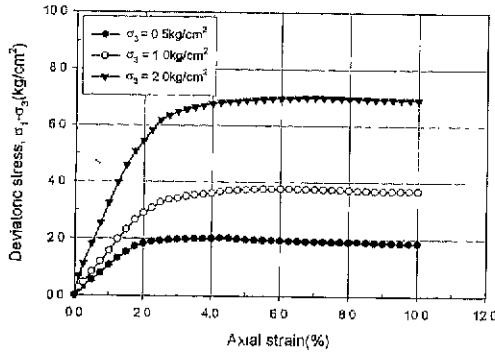


그림 3. 축차응력-축변형률 곡선

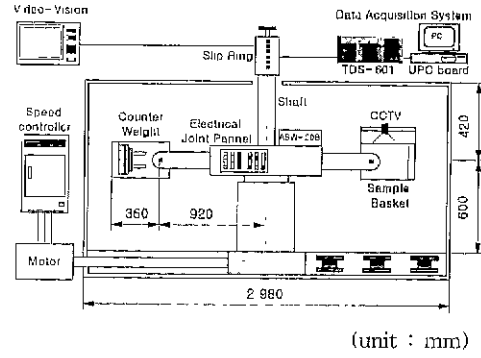


그림 4. 원심모형시험기의 개요도

2.2 원심모형실험

2.2.1 실험장치 및 기구

(1) 원심모형시험기

본 연구에서 사용한 원심모형 시험기의 개요도는 그림 4와 같으며, 주요 제원을 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 바와 같이 최대원심가속도는 200g-level, 최대용량은 20g · ton으로 실험가능한 모형토조의 최대크기는 500×500×300mm이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920mm, 스윙바스켓 저면까지의 거리는 1280mm로 제작되었다.

(2) 모형토조

2차원 평면변형률 조건에서 실험하기 위한 모형토조는 그림 5와 같이 3면과 밑면은 2mm 두께의 스테인레스로, 전면은 20mm 두께의 투명 아크릴판으로 제작하였으며, 내부 크기는 가로 475mm, 세로 150mm, 높이 420mm이다. 모형토조 상부에는 실험중 지하수위를

조절하기 위한 수조가 설치되어 있으며, 이 수조로부터 물공급은 솔레노이드 밸브를 통하여 조절할 수 있게 되어 있다. 한편, 모델박스 측면에는 굴착면에서의 물의 배수와 rubber bag으로부터 zinc chloride 용액의 배수를 위한 두 개의 구멍이 있으며, 이들은 각각 토조 후면의 수조와 용액저장탱크와 연결되어 있고, zinc chloride 용액의 배수는 솔레노이드 밸브에 의해 작동된다.

(3) 모형벽체

본 연구에서 diaphragm wall을 재현하기 위한 모형벽체는 불투수성으로 유효 휨강성을 갖는 두께 8mm인 알루미늄합금으로 제작하였으며, 이는 알루미늄 합금이 현장 diaphragm wall의 단위중량과 유사할 뿐만 아니라 재료의 균질성으로 인하여 반복실험에서 오차를 감소시킬 수 있기 때문에 사용하였다. 이 재료를 현장 축척으로 환산한 휨강성(EI)은 $5.07 \times 10^{11} \text{kgcm}^2/\text{m}$ 이며, 이것은 두께 600mm인 원형 diaphragm wall의 휨강성과 유사하다. 모든 실험에서 모형벽체의 폭은 148mm로 제작하였으며, 높이는 실험조건에 따라 240~350mm인 것을 사용하였으며, 물리적 특성을 표 3에 나타내었다.

표 2. Centrifuge specifications

| | |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Manufacturer | Dong-Ah Testing & Seikensha |
| G-range | 1 to 200g at 920mm |
| Motor | 10 HP hydraulic motor |
| Working radii | 920mm-center to basket hinge 1,280mm-center to basket floor |
| RPM range | 0~500 rpm |
| Payload capacity | 25g · ton |
| Test package size | 500mm×500mm×300mm in max |
| Electrical pick-ups | 24 slip rings |
| Monitoring and measuring system | TDS 601, ASW-20B, UPC Board, LVDT, Strain gage, Miniature pore pressure transducer, PC |

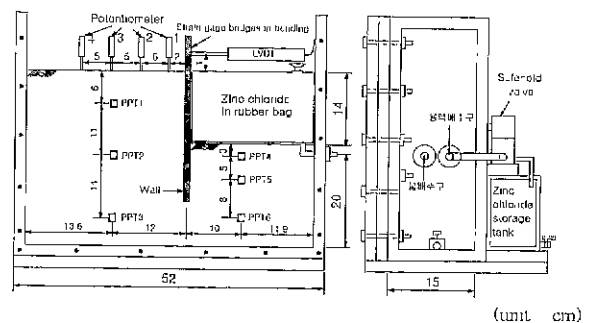


그림 5. 모형토조의 개요도

표 3. 모형벽체의 물리적 특성

| Properties | Model | Prototype |
|--------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Unit weight, γ (g/cm ³) | 2.70 | 2.70 |
| Modules of elasticity, E (kg/cm ²) | 7.14×10^5 | 7.14×10^5 |
| Thickness(cm) | 0.8 | 44 |
| Second moment of area, I (cm ⁴ /m) | 4.27 | 7.10×10^5 |
| Bending stiffness EI (kgcm ² /m) | 3.05×10^6 | 5.07×10^{11} |

본 연구에서 지반굴착을 재현하기 위하여 zinc chloride 기법을 사용하였으며, zinc chloride 용액을 저장하기 위하여 가로 215mm, 높이 150mm, 폭 150mm인 latex rubber bag을 제작하였다. Zinc chloride 기법은 Kusakabe(1982)에 의해 굴착을 재현하는 데 사용된 후 원심모형실험에서 지반굴착 재현에 합리적인 방법으로 인식되어 널리 사용되고 있다(Powrie, 1986; Bolton & Stewart, 1994). 이 방법은 흙과 동일한 밀도로 혼합된 zinc chloride 용액이 배수됨에 따라 지표면 아래의 흙요소에 대한 수평응력 감소가 점진적으로 재현되어 현장의 굴착과정을 쉽게 표현할 수 있다.

(5) 계측장치

본 실험에서 계측기는 소형 간극수압계, potentiometer, LVDT, strain gage를 사용하였으며, 대표적인 계측기의 설치위치를 그림 5에 나타내었다. 실험중 모형지반 내부의 간극수압을 측정하기 위하여 3шт ENG사의 직경 7mm, 높이 6mm로 모델명 P306A인 초소형 간극수압계 6개를 사용하였으며, 4개의 potentiometer는

벽체배면의 표면침하를 측정하기 위하여 사용하였다. 또한, 벽체변위를 측정하기 위해 1개의 LVDT(APEK 사)를 사용하였고, 벽체의 휨모멘트를 측정하기 위하여 각 실험마다 10~13개의 strain gage(FLA-6 · 350-23)를 사용하였다. 실험중 계측기로부터 자료는 TDS 601과 UPC 보드를 통하여 측정하였다.

2.2.2 실험방법

모형실험은 표 4에 나타낸 바와 같이 벽체의 근입깊이 비, 지하수위 및 굴착 조건에 따라 총 11회의 실험을 실시하였다. 모든 실험에서 굴착은 55g-level에서 수행하였고, 이는 벽체의 휨강성을 고려하여 결정하였으며, 55g-level 까지 원심 가속하는데 약 15분이 소요되었다. 실험 DW 5~8에서 지하수위는 배면측의 지표면과 동일하게 유지하였으며, 실험 DW 1~4에서는 굴착후 1시간, 실험 DW 5~8에서는 2시간 후에 시험을 종료하였다. 실험 DW 9~11에서는 굴착단계를 5단계로 하여 실험을 수행하였으며, 굴착전의 지하수위는 배면측의 지표면과 동일하도록 하였다. 연속굴착 실험 DW 1~8에서 굴착속도는 3.11cm/min이었으며, 실험 DW 9~11에서는 굴착단계별로 2.71(단계 1), 2.35, 2.01, 1.70, 1.43(단계 5)cm/min의 속도로 굴착을 실시하였다.

본 연구에서 모형실험을 다음과 같은 과정, 즉 ①지반형성(벽체 및 계측기설치), ② 굴착부분 시료제거(rubber bag 설치 및 zinc chloride 용액주입) ③ 모형토조 스윙바스켓에 설치 및 계측기설치(LVDT), ④ 계측기점검 및 연결, ⑤

표 4. 모형실험 조건

| Test No. | Groundwater level | Embedded depth (cm) | Excavation height (cm) | Embedment ratio | Excavation stage |
|----------|-------------------|---------------------|------------------------|-----------------|------------------|
| DW 1 | - | 6 | 14 | 0.43 | 1 |
| DW 2 | - | 12 | 14 | 0.86 | 1 |
| DW 3 | - | 18 | 14 | 1.29 | 1 |
| DW 4 | - | 18 | 10 | 1.80 | 1 |
| DW 5 | Ground surface | 6 | 14 | 0.43 | 1 |
| DW 6 | Ground surface | 12 | 14 | 0.86 | 1 |
| DW 7 | Ground surface | 18 | 14 | 1.29 | 1 |
| DW 8 | Ground surface | 18 | 10 | 1.80 | 1 |
| DW 9 | Ground surface | 6 | 14 | 0.43 | 5 |
| DW10 | Ground surface | 12 | 14 | 0.86 | 5 |
| DW11 | Ground surface | 18 | 14 | 1.29 | 5 |

55g-level까지 원심가속후 지반굴착 재현의 과정으로 수행하였다. 본 실험에서 모형지반은 불충분다짐법을 사용하여 최적함수비에서 최대건조단위중량의 95%로 형성하였다. 예비실험결과 한층의 두께를 2cm로 하는 경우 깊이 에 따라 비교적 균질한 지반을 형성할 수 있었기에 모형 지반 형성시 한층의 두께를 2cm로 총 17층으로 하여 형성 하였다. 지반성형후 굴착을 나타내는 부분의 시료를 제거 하고 latex rubber bag을 설치한 후 rubber bag에 zinc chloride용액을 채웠다. 굴착은 원심모형실험동안 zinc chloride 용액이 배수되도록 밸브를 조작하여 실시하였다. 실험과정동안 시간 경과에 따른 벽체의 휨모멘트와 변위, 벽체배면의 표면침하, 지반내의 간극수압을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 벽체배면의 표면침하

지반굴착에 의한 벽체 배면지반의 표면침하는 배면측 상부에 설치한 4개의 potentiometer로부터 측정하였으며, 연속굴착시(DW 1~8) 벽체 배면지반의 표면침하를 근입 깊이비에 따라서 그림 6~9에 나타내었다. 그림 6~9로부터 실험 DW 1~4에서 굴착전의 침하량은 벽체의 근입깊이 에 관계없이 1.6(potentiometer 4)~2.4mm(potentiometer 1)로 potentiometer 4를 제외하고 거의 균일하게 발생한다 는 것을 알 수 있다. 즉, potentiometer 4에서 굴착전의 침하 량은 potentiometer 1~3에 비해 12~30% 정도 작게 나타 났다. 실험 DW 1~4에서 굴착과정동안 표면침하는 벽체 에 인접한 부분(potentiometer 1)을 제외하면 거의 발생하 지 않았으며, 벽체에 인접한 부분에서는 0.25(DW 4)~ 1.2mm(DW 1) 정도 발생하였고, potentiometer 1에서 측정

된 굴착완료후의 시간경과에 따른 침하량은 0.04~ 0.12mm로 거의 발생하지 않았다. 한편, 지하수위가 지표 면과 일치하는 실험 DW 5~8에서 측정된 굴착전의 표면 침하량은 지하수위가 없는 경우에 비해 2배 이상 크게 나 타났으며, 실험 DW 5와 6에서는 굴착동안 벽체에 인접한 부분에서 굴착전의 침하량에 비해 4.8(DW 6)~7.6배(DW 5)의 과도한 침하가 발생하여 파괴상태에 도달하였다. 한 편, 실험 DW 7과 8에서 potentiometer 1로부터 측정된 굴 착동안의 침하량은 굴착전에 비해 1.4~2배정도 크게 발 생하였지만 파괴는 발생하지 않았다.

그림 10은 실험 DW 5~8의 potentiometer 1에서 측정된 시간 경과에 따른 표면침하를 나타낸 것으로 굴착완료후 시간경과에 따라 발생된 표면침하는 0.17~0.74mm로 지 하수위가 없는 경우에 비해 4~12배정도 크게 발생하였으 며, 굴착완료후 발생된 침하량 증분을 굴착완료시의 침하 량으로 나눈 값은 0.005(DW 5)~0.21(DW 8)로 근입깊이 비가 증가할수록 시간경과에 따른 침하량 증분이 증가한 다는 것을 알 수 있으며, 이 그림에서 화살표(↓)는 굴착완 료 시점을 의미한다. 그림 11은 실험 DW 1~8에서 지반굴 착 과정동안 potentiometer 1에서 측정된 표면침하량과 벽 체의 근입깊이비와의 관계를 나타낸 것으로 근입깊이비 가 증가할수록 표면침하량이 감소함을 알 수 있다. 즉, 실험 DW 1~4에서 근입깊이비에 따른 침하량은 약 0.22의 기울기로 감소하고, DW 5~8에서는 지하수위가 없는 경 우에 비해 약 3.7배정도 큰 0.802의 기울기로 감소하는 것 으로 나타났다.

그림 12~14는 단계굴착 실험 DW 9~11에서 굴착완료 시에 측정된 표면침하량을 근입깊이비에 따라 도시한 것 으로서 1단계 굴착완료시의 침하량은 굴착전의 침하량과 거의 유사하고, 굴착이 진행될수록 침하량이 증가하며, 근

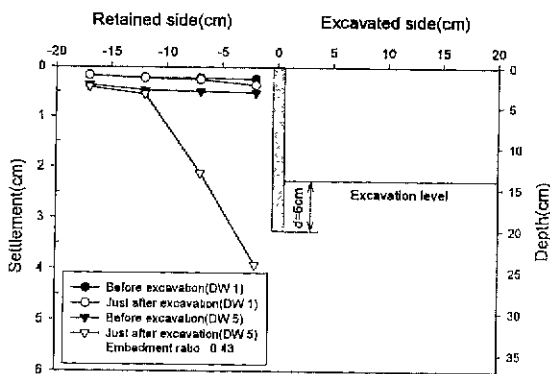


그림 6. 표면침하(DW 1, DW 5)

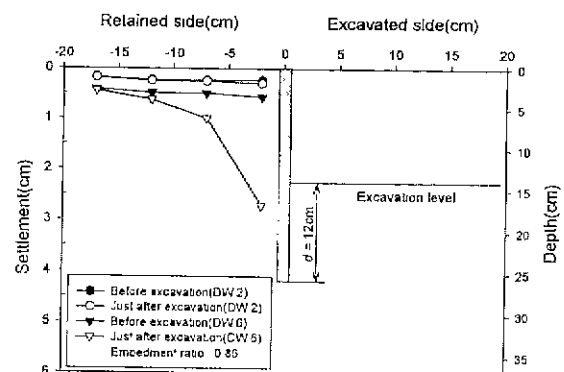


그림 7. 표면침하(DW 2, DW 6)

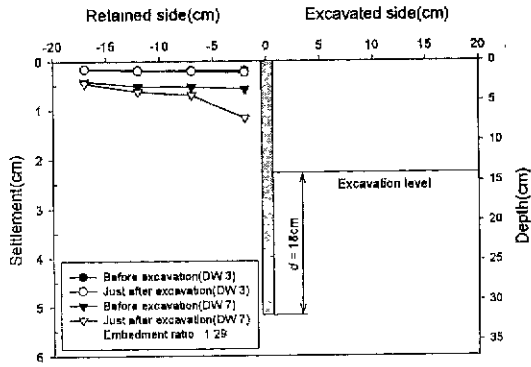


그림 8. 표면침하(DW 3, DW 7)

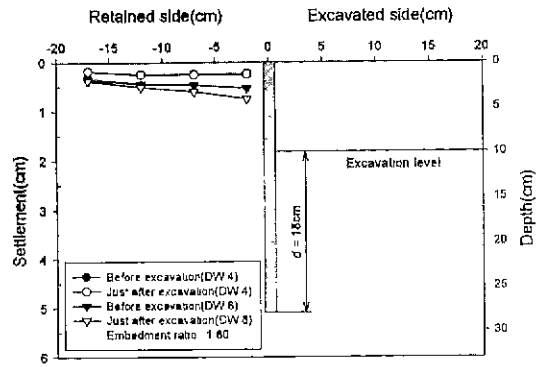


그림 9. 표면침하(DW 4, DW 8)

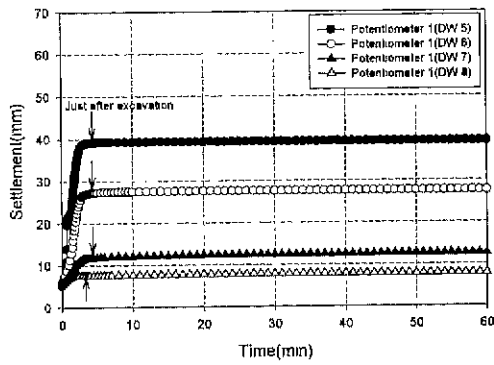


그림 10. 시간에 따른 표면침하(DW 5~8)

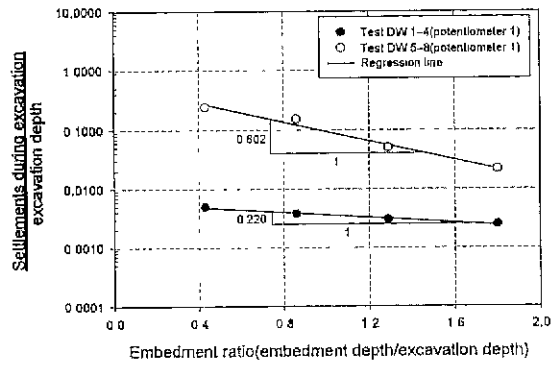


그림 11. 굴착과정중의 표면침하

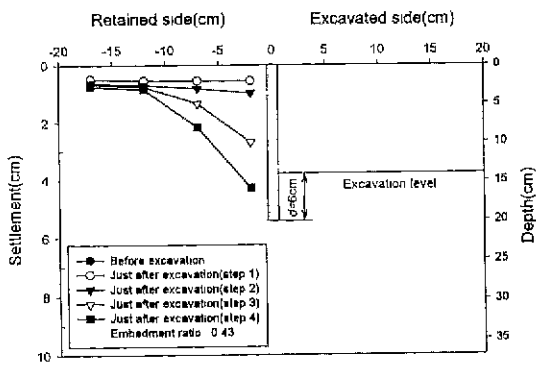


그림 12. 표면침하(DW 9)

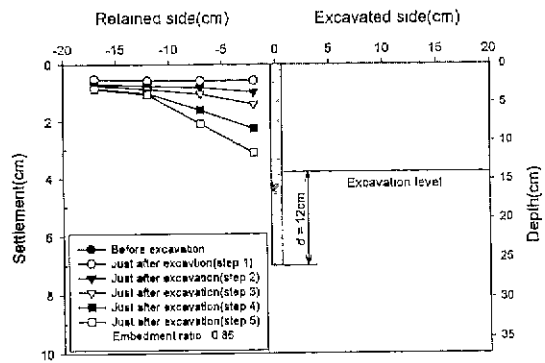


그림 13. 표면침하(DW 10)

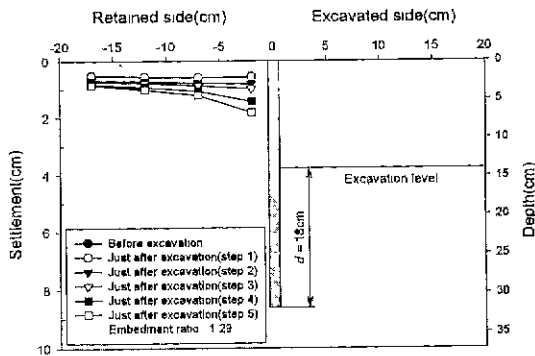


그림 14. 표면침하(DW 11)

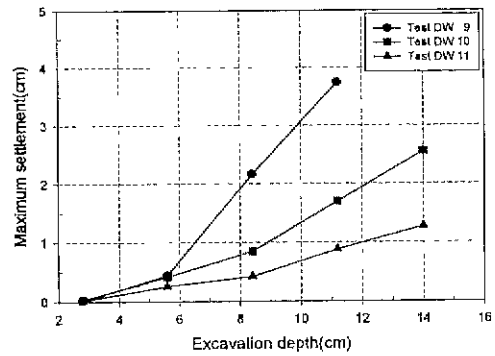


그림 15. 굴착깊이에 따른 최대표면침하

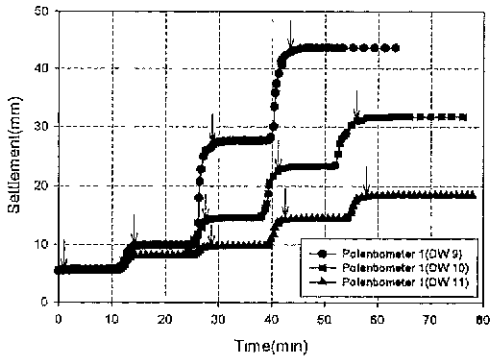


그림 16. 시간에 따른 표면침하(DW 9~11)

입깊이비가 증가할수록 침하량이 감소함을 알 수 있다. 큰 입깊이비가 0.43인 경우 3단계 굴착과정시, 큰 입깊이비가 0.86인 경우에는 4단계 굴착과정 중에 전 단계에 비하여 침하가 급격하게 발생하였다. 그림 15는 실험 DW9~11에서 측정된 최대침하량을 굴착깊이에 따라 나타낸 것으로 DW9에서는 2단계이후, DW 10~11에서는 3단계이후의 굴착단계에서 침하량이 급격히 증가함을 알 수 있으며,

또한, 큰 입깊이비가 증가할수록 굴착깊이에 따른 최대침하량이 증가율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림 16은 실험 DW 9~11에서 potentiometer 1에서 측정된 시간경과에 따른 벽체 배면의 표면침하를 나타낸 것으로 최종 굴착단계에서 굴착완료후의 시간경과에 따른 침하량(0.24~0.79mm)은 굴착과정중의 침하량에 비해 5~7% 정도를 나타내었으며, 여기서, 화살표(↓)는 각 단계별 굴착완료 시점을 의미한다.

3.2 지반 변위 및 파괴면

본 연구에서 지반변위는 지반속에 2cm 간격으로 설치한 maker의 좌표를 읽어 측정하였으며, 어느 정도의 오차는 포함되어 있어 지반의 변위가 작은 경우에 지반의 변화 상태를 정확하게 측정하기 어렵다. 그러나 이러한 측정자료는 크기를 결정하기보다는 굴착에 의한 지반의 변형 형태를 규명하는데 중요하다고 생각된다. 따라서, 지반의 변형이 크게 발생하여 파괴상태에 도달한 경우에 대해서만

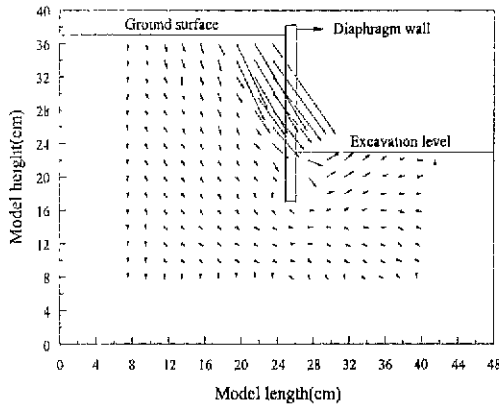


그림 17. 굴착에 의한 지반변위(DW 5)

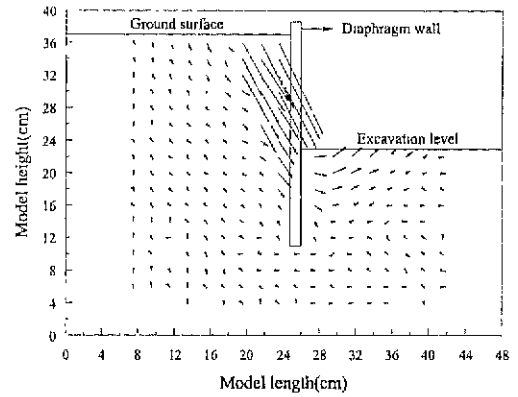


그림 18. 굴착에 의한 지반변위(DW 6)

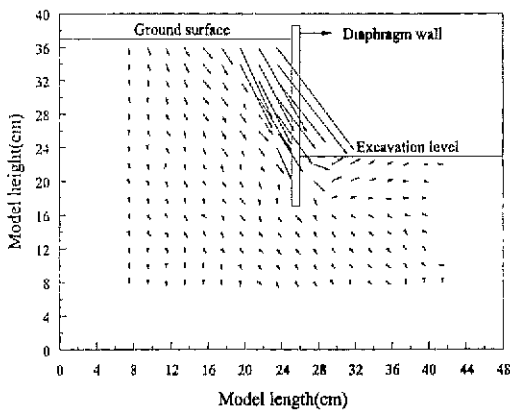


그림 19. 굴착에 의한 지반변위(DW 9)

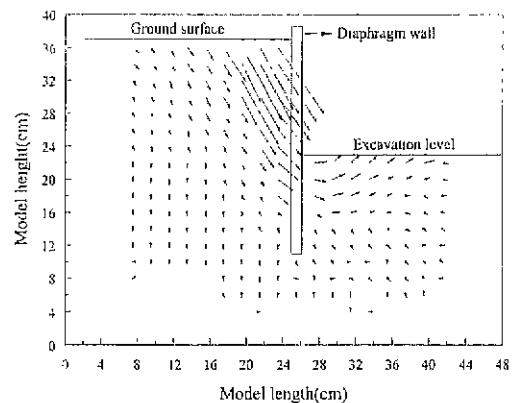


그림 20. 굴착에 의한 지반변위(DW 10)

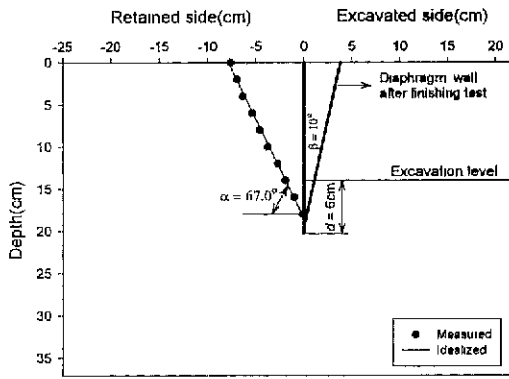


그림 21. 파괴면의 위치(DW 5)

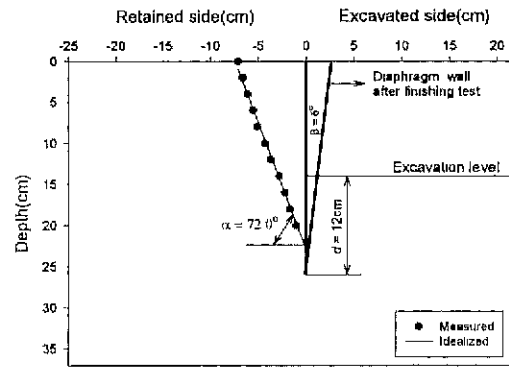


그림 22. 파괴면의 위치(DW 6)

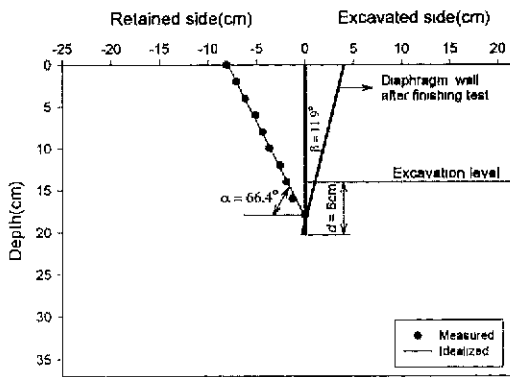


그림 23. 파괴면의 위치(DW 9)

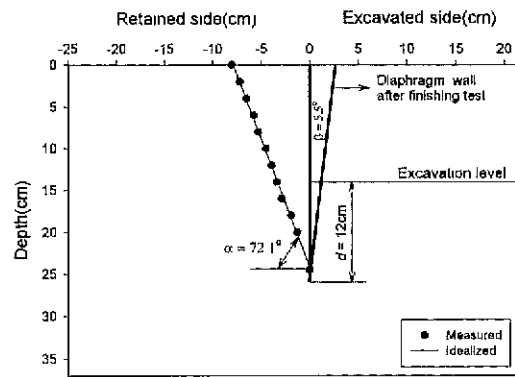


그림 24. 파괴면의 위치(DW 10)

설명하고자 한다.

그림 17과 18은 각각 실험 DW 5와 6에서, 그림 19와 20은 실험 DW 9와 DW 10에서 측정된 지반굴착에 의해 발생된 지반변위를 도시한 것이며, 여기서 파괴면내의 변위를 제외하면 그 크기가 상당히 미소하기 때문에 지반의 변형 형태를 파악하기 위하여 변위벡터의 크기를 2.5배로 확대하여 나타내었다. 이로부터 벽체에 인접한 배면측 지반은 굴착에 의해 벽체 쪽을 향하여 하향의 변위를 일으키며, 벽체에 인접한 굴착측의 지반변위는 상향변위를 일으킴을 알 수 있다. 한편, 그림 17~20으로부터 굴착측의 벽체에 근접한 부분(x좌표 27.5cm에서 y 좌표 16~22cm)에서 측정된 변위는 벽체의 회전에 의해 지반이 압축되면서 하향의 변위를 일으키는 것으로 나타났다. 또한 실험 DW 5에서 파괴면내의 지반변위는 연직면과 약 32° 의 각도, 실험 DW 6에서는 25° 정도를 이루고 있으며, 이것은 실험후 측정된 파괴면과 변위발생후의 벽체사이의 각(실험 DW 5와 6에서 각각 33.0° , 24.0° , 그림 21~22 참조)과 거의 일치하고 있다. 주동 파괴면내의 변위벡터의 각도로부터 파괴면은 $65\sim 70^\circ$ 정도이며, 이것은 주동파괴면의 각도

($45 + \phi/2$)와 거의 유사하거나 약간 크게 나타났다. 한편, 실험에서 수동측(굴착면측)에서는 명백한 파괴면의 형태가 발생하지 않았으나, 굴착면 상부에서 측정된 변위벡터의 각도로부터 추정된 파괴면의 각도는 수동파괴면의 각도와 유사함을 알 수 있었다.

그림 21과 22는 명백한 지반파괴가 발생한 실험 DW 5와 6에서 측정된 파괴면의 위치를 나타낸 것으로 여기서, 파괴면의 위치는 모형지반 형성시 일정간격으로 설치한 염색사의 위치를 측정하여 구하였으며, 또한 그림 17~18에 나타난 지반의 변위벡터를 고려하여 결정하였다. 그림 21과 22에서 알 수 있는 바와 같이 배면측에서 측정된 파괴면은 직선적인 형태를 나타내었으며, DW 5에서 파괴면이 수평면과 이루는 각도(α)는 67.0° 로 주동파괴면의 각도($45 + \phi/2$)보다 3° 정도 크게 평가되었고, 이 파괴면의 각도로부터 역산한 내부마찰각은 44° 로 삼축압축시험 결과보다 크게 평가되었으며, 이는 모형실험이 2차원 평면변형조건에서 실시되었기 때문인 것으로 생각된다. 실험 DW 6에서 파괴면의 각도는 72.0° 로 실험 DW 5에서 측정된 것보다 5° 정도 크게 발생하였다. 한편, 파괴시 벽체의

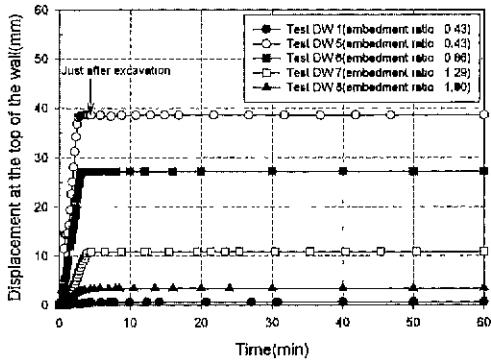


그림 25. 벽체 상부의 변위(DW 1~8)

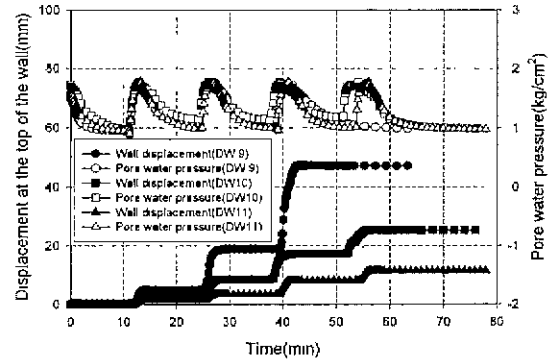


그림 26. 벽체상부의 변위(DW 9~11)

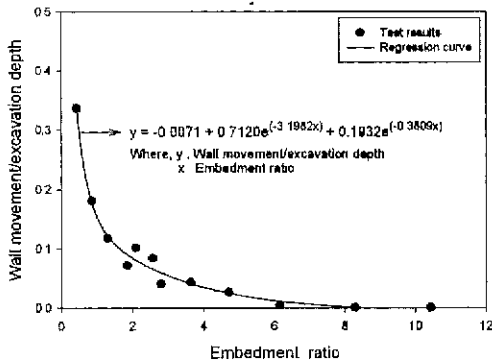


그림 27. 근입깊이비와 벽체변위(DW 9~11)

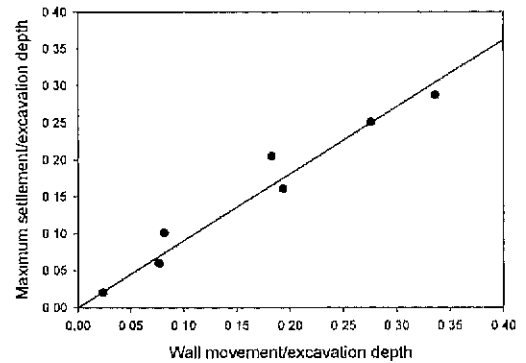


그림 28. 벽체변위와 최대침하량과의 관계

회전각(β)은 DW 5와 6에서 각각 10° 와 6° 로 나타났다. 실험 DW 5와 6에서 벽체 상단으로부터 파괴면까지의 거리는 각각 $0.56h$ 와 $0.53h$ (여기서, h 는 굴착높이)로 근입깊이비가 작은 경우가 6% 정도 크게 발생하였고, 굴착면을 기준으로 한 파괴면의 깊이는 DW 5에서는 $0.31h$, DW 6에서는 $0.63h$ 위치까지 발달하였다. 그림 23과 24는 단계 굴착 실험 DW 9와 DW 10에서 측정된 파괴면의 위치를 나타낸 것으로 배면측 파괴면이 수평면과 이루는 각도는 각각 66.4° 와 72.1° 로 실험 DW 5와 DW 6의 결과와 거의 일치하며, 벽체 상단으로부터 파괴면까지의 수평거리는 약간 크게 발생함을 알 수 있었다.

그림 21~24로부터 굴착에 의한 지반의 파괴는 벽체 하단이 회전중심이 되어 벽체 상단이 굴착면 쪽으로 회전되면서 파괴되었으며, 이러한 파괴형태는 Powrie(1986)에 의한 실험결과와 유사한 경향을 나타내었다.

3.3 벽체 변위

그림 25는 벽체 상단에서 측정된 굴착동안 및 굴착완료 후의 시간경과에 따른 벽체변위를 나타낸 것으로 여기서, 화살표(\downarrow)는 굴착완료 시점을 의미한다(근입깊이비가

1.8인 경우의 굴착완료시점은 약 3.3분 정도이며, 다른 모든 경우에서 굴착완료시점은 약 4.5분 정도이다). 이로부터 지하수위가 diaphragm wall의 거동에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉, 지하수위가 없는 경우인 실험 DW 1에서 측정된 최대변위는 약 0.57mm 이므로 안정한 상태에 있으나, 지하수위가 있는 경우 근입깊이비가 1이하인 실험 DW 5와 6에서는 굴착이 진행됨에 따라 변위가 급속하게 발생하여 굴착완료전에 파괴상태에 도달하였으며, 측정된 최대변위는 각각 38.65와 27.19mm로 potentiometer 1에서 측정된 최종 표면침하량과 거의 일치하였다. 한편, 실험 DW 7과 8에서 지반의 파괴는 발생하지 않았으며 측정된 최대변위는 각각 10.85와 3.35mm로 나타났다. 실험 DW 5~8에서 굴착완료후의 시간경과에 따른 벽체변위는 0.05~0.18mm로 굴착완료시의 벽체변위에 비해 미소하게 발생하는 것으로 나타났으며, 근입깊이로 정규화한 굴착완료후의 시간경과에 따른 벽체변위 0.04~0.08%로 근입깊이비가 증가할수록 감소하였다.

그림 26은 단계굴착 실험 DW 9~11에서 측정된 간극수압과 벽체의 변위를 나타낸 것으로 1단계 굴착완료시 벽체변위는 거의 발생하지 않았으며, 근입깊이비가 증가할수록 벽체변위가 작게 나타났다. DW 9인 경우에는 4단

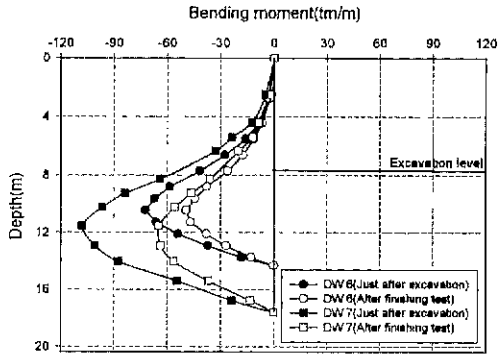


그림 29. 깊이에 따른 휨모멘트 분포

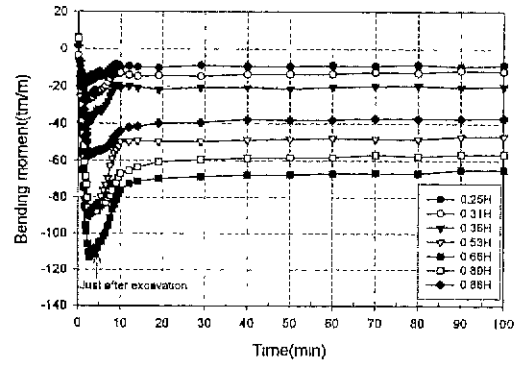


그림 30. 시간에 따른 휨모멘트분포(DW 7)

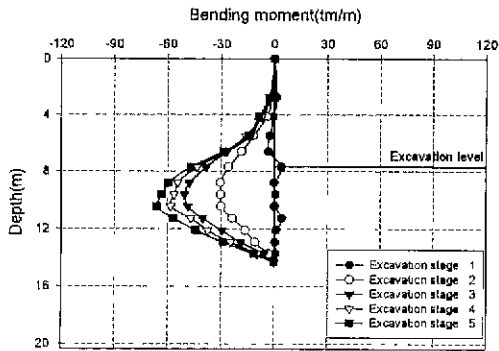


그림 31. 휨모멘트 분포(DW10, 굴착직후)

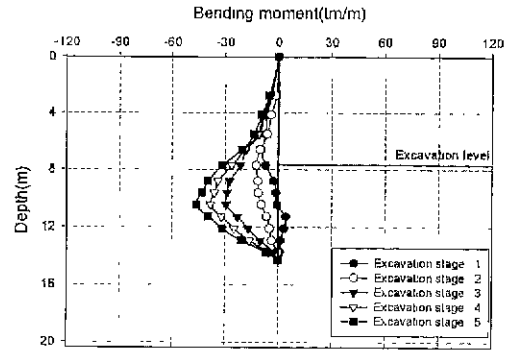


그림 32. 휨모멘트 분포(DW10, 종료)

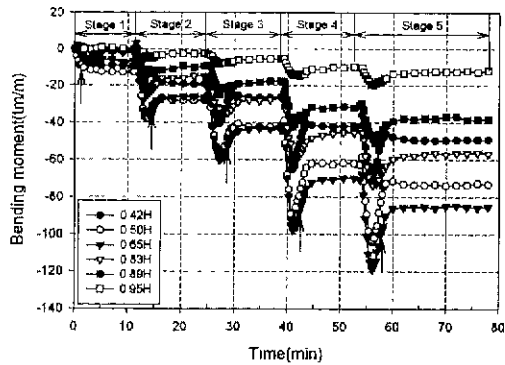


그림 33. 굴착단계별 휨모멘트(DW11)

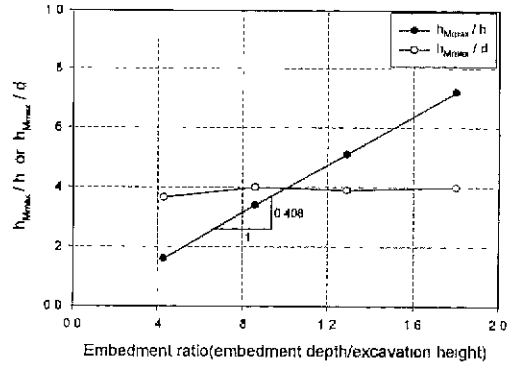


그림 34. 최대휨모멘트 발생깊이와 근입비 관계

계 굴착완료시의 변위가 47mm 정도로 완전한 파괴상태에 도달하였으며, DW 10에서는 5단계 굴착과정중에 지반의 파괴가 발생하였다. 실험 DW 9~11에서 굴착완료후의 시간경과에 따른 벽체변위를 근입깊이로 정규화한 값은 0.03~0.08%로 근입깊이비가 증가할수록 감소하였다. 그림 27은 굴착단계별 굴착깊이로 정규화한 벽체변위와 근입깊이비와의 관계를 나타낸 것으로 이로부터 근입깊이비가 증가함에 따라 벽체변위가 감소하며, 이 관계는 그

림 27에 나타낸 바와 같이 $y = y_0 + ae^{-bx} + ce^{-dx}$ 의 5변수 지수감소 함수식으로 표현되며, 이 때의 결정계수(R^2)는 0.985로 결정되었다.

그림 28은 실험 DW 5~8에서 측정된 최대 표면침하량과 벽체변위를 굴착깊이로 정규화하여 나타낸 것으로 지반굴착에 의해 발생하는 최대침하량은 벽체 변위량의 0.8~1.2배 사이에 분포하고 있으며, 평균 0.91배($R^2 = 0.960$) 정도를 나타내었다.

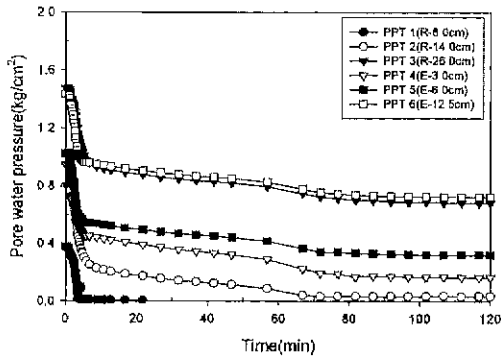


그림 35. 시간경과에 따른 간극수압(DW 5)

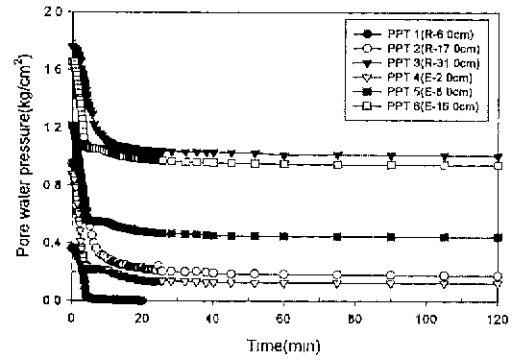


그림 36. 시간경과에 따른 간극수압(DW 6)

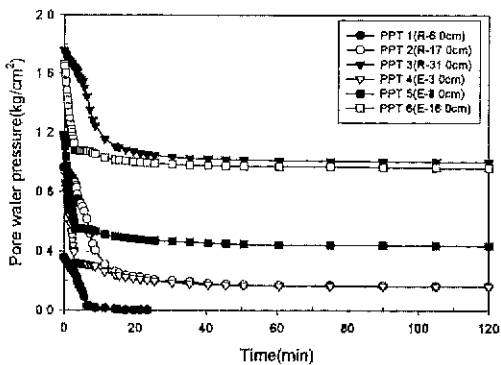


그림 37. 시간경과에 따른 간극수압(DW 7)

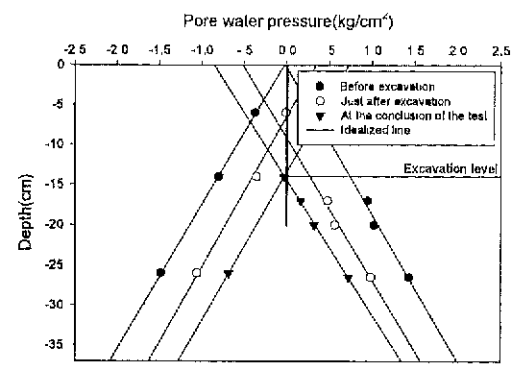


그림 38. 깊이에 따른 간극수압분포(DW 5)

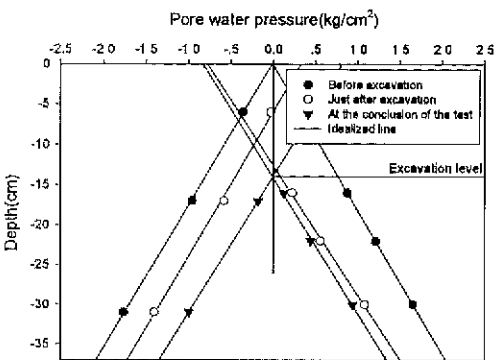


그림 39. 깊이에 따른 간극수압분포(DW 6)

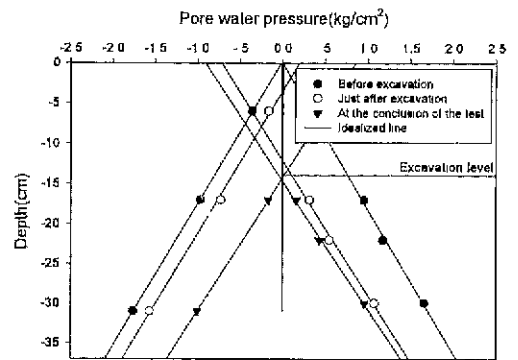


그림 40. 깊이에 따른 간극수압분포(DW 7)

3.4 휨모멘트 분포

본 연구에서 벽체의 휨모멘트 분포는 굴착면측의 벽체중 앙부에 설치한 변형계(strain gage)로부터 측정된 변형량 으로부터 구하였으며, 그 결과를 근입깊이비에 따라서 그림 29~34에 나타내었다. 단, 지하수위가 없는 경우에는 벽체의 변형량이 너무 작아서 지하수위가 있는 경우에 대한 실험결과만을 나타내었으며, 상사법칙을 적용하여 원

형축적으로 환산하여 나타내었다. 그림 29에 나타낸 바와 같이 실험 DW 6과 7에서 실험종료시의 최대휨모멘트는 각각 49.3과 64.8t · m/m로 굴착완료시의 최대휨모멘트에 비해 각각 32, 40% 정도 작게 측정되었으며, 이것은 그림 38~40의 간극수압분포에서 알 수 있는 바와 같이 굴착과정 및 이후에 배면측에서 굴착측으로 침투가 발생하여 배면측의 지하수위가 저하하기 때문인 것으로 생각된다.

그림 30은 DW 7에서 시간경과에 따라 측정된 휨모멘트

를 나타낸 것으로 여기서, H는 벽체의 전체길이, 즉, 굴착 깊이+근입깊이를 의미하며, 13개의 변형계중 중복되지 않는 대표적인 7개 지점에서 측정된 값만을 나타내었다. 이로부터 벽체의 휨모멘트는 굴착후 평형상태에 도달하는 약 8분까지 급격하게 감소하고, 이는 그림 37에 나타낸 시간경과에 따른 배면측에서 측정된 간극수압과 잘 대응하고 있으며, 벽체 상부(0.5H이상)에서는 약 9분 경과시 휨모멘트가 최소값을 나타낸 후 시간경과에 따라 비교적 일정한 값을 나타낸다. 최대 휨모멘트가 발생하는 지점에서 측정된 자료로부터 평형상태 이후 실험종료시까지 시간경과에 따른 휨모멘트의 감소속도는 분당 0.087tm/m로 나타났다. 한편, 근입깊이비가 증가할수록 측정된 휨모멘트는 증가하며, 굴착완료시의 값을 비교하면 근입깊이비가 1.29(DW 8)인 경우가 근입깊이비가 0.86(DW 7)인 경우에 비해 49% 정도 크게 평가되었다.

그림 31과 32는 각각 굴착완료시 및 각 단계별 종료시 DW 10에서 측정된 깊이에 따른 휨모멘트분포를 나타낸 것으로 굴착이 진행됨에 따라 휨모멘트는 증가하며, 최대 휨모멘트 발생깊이는 벽체 저면쪽으로 그 위치가 이동함을 알 수 있으며, 최종단계에서 실험종료시의 최대휨모멘트는 46.2t·m/m로 굴착완료시에 비해 30% 정도 작게 평가되었으며, DW 6에서 측정된 값과 거의 일치하였다. 또한, 근입깊이비에 따른 최대휨모멘트는 근입깊이비가 증가할수록 증가하며, DW 11에서 최종단계 굴착완료시의 최대휨모멘트는 DW 10에 비해 48%정도 크게 평가되었다. 그림 33은 DW 11에서 시간경과에 따라 측정된 휨모멘트를 나타낸 것으로 여기서, H는 벽체의 전체길이를, 화살표(↑)는 각 단계별 굴착완료시점을 의미하며, 중복되지 않는 대표적인 6개 지점에서 측정된 값만을 나타내었다. 최종단계에서 측정된 최대 휨모멘트는 0.65H지점(11.55m)에서 발생하며, DW 10에서와 마찬가지로 굴착이 진행됨에 따라 최대휨모멘트 발생깊이는 벽체저면으로 이동함을 알 수 있다. 또한, 각 단계별 시간경과에 따른 휨모멘트는 굴착후 약 2~3분 경과시까지 급격히 감소하며, 이것은 그림 26에 나타낸 간극수압 분포와 대응하고 있음을 알 수 있으며, 여기서, 간극수압의 측정위치는 굴착배면측 지표면에서 32cm 깊이이다. 최대 휨모멘트가 발생하는 지점에서 평형상태에 도달한 이후 시간경과에 따른 휨모멘트의 감소속도는 분당 0.095(DW 10)~0.110(DW 11)t·m/m로 나타났다.

그림 34는 실험 DW 5~8에서 측정된 근입깊이비에 따른 굴착면으로부터 최대휨모멘트의 발생깊이까지의 거

리(h_{Mmax})를 굴착높이(h)와 근입깊이(d)로 정규화하여 나타낸 것이다. 이로부터 굴착높이로 정규화한 최대휨모멘트 발생위치는 근입비가 증가함에 따라 0.408의 기울기로 비례적으로 증가 즉, 근입깊이비가 증가할수록 최대휨모멘트 발생지점이 굴착면 아래에 위치한 반면, 근입깊이로 정규화한 최대휨모멘트 발생깊이(h_{Mmax}/d)는 0.365~0.40(평균 0.39)으로 근입비에 관계없이 비교적 일정한 깊이에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한, DW 9~11에서도 최종단계시 측정된 최대휨모멘트 발생깊이(h_{Mmax}/d)는 그림 34와 동일한 값을 나타내었다.

3.5 간극수압 거동

모형실험시 지하수위 조절 및 굴착에 의한 지반내부의 간극수압 거동을 분석하기 위하여 초소형 간극수압계를 배면측과 굴착면측에 모형지반 형성시 설치하였다.

그림 35~37은 실험 DW 5~7에서 측정된 굴착직후부터 시간경과에 따른 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 지반내의 간극수압은 위치에 관계없이 굴착과정 및 굴착직후에 배수가 지배적으로 발생하여 급격하게 감소하였으며, 일정시간 경과 후부터의 간극수압의 변화는 미소하다는 것을 알 수 있다. 즉, 실험 DW 5~7에서 굴착과정동안 벽체 배면측에서 간극수압의 분당 감소속도는 각각 0.12, 0.10, 0.06kg/cm²으로 근입깊이비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸 반면, 굴착측에서 분당 간극수압의 감소속도는 0.12, 0.14, 0.14kg/cm²으로 근입깊이에 관계없이 비교적 일정하였고, 실험종료시 간극수압의 감소속도는 0.00025~0.0003kg/cm² 정도로 굴착과정에 비해 크게 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 실험 DW 6과 7의 배면측에서 굴착완료후 약 12분 경과시 간극수압이 평형상태에 도달하였으며, 이것은 단계굴착시 최종 굴착단계에서 평형상태에 도달하는데 소요되는 시간(10~12분)과 거의 일치하였다.

그림 38~40은 실험 DW 5~7에서 측정된 굴착전, 굴착직후 및 실험종료시의 간극수압 분포를 도시한 것이다. 이로부터 간극수압은 깊이에 따라 선형적으로 변화하고, 굴착직후 굴착측에서의 간극수압은 침투수압에 의해 정수압력보다 크게 나타나고 있으며, 실험종료시의 간극수압은 정수압상태에 근접하였다.

4. 결론

본 연구에서는 화강토 지반상에 시공된 diaphragm wall

의 거동을 연구하기 위하여 벽체의 근입깊이비, 지하수위 및 굴착조건에 따른 원심모형실험을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 굴착에 의해 발생된 표면침하량은 근입깊이비가 증가함에 따라 감소하였으며, 최종 굴착단계에서 시간경과에 따른 침하량은 굴착과정중의 침하량에 비해 5~7% 정도를 나타내었다.
- (2) 최대 표면침하량과 벽체변위를 굴착깊이로 정규화한 결과 굴착에 의해 발생된 최대침하량은 벽체 변위량의 0.8~1.2배(평균 0.91배) 사이에 분포하였다. 굴착 후의 시간경과에 따른 벽체 변위를 근입깊이로 정규화한 값은 0.03~0.08%로 근입깊이비가 증가할수록 감소하였으며, 굴착깊이로 정규화한 벽체변위와 근입깊이비와의 관계는 지수 함수식으로 제안하였다.
- (3) 지하수위가 있는 경우 근입깊이비가 1.0 정도 이하에서는 명백한 파괴가 발생하였으며, 파괴면은 직선적인 형태로 파괴면내의 배면측 지반은 벽체를 향하여 하향의 변위를 일으키면서 벽체의 회전에 의해 파괴되었다. 파괴면의 각도는 66~72.5° 정도로 이론적인 파괴면의 각도보다 크게 평가, 즉 파괴면으로부터 역산한 내부마찰각이 삼축시험결과보다 과대 평가되었다.
- (4) 측정된 휨모멘트는 근입깊이비가 증가할수록 크게 나타났으며, 근입깊이로 정규화한 최대휨 모멘트 발생깊이(h_{Mmax}/d)는 평균 0.39로 일정하며, 최대 휨모멘트 발생지점에서 시간에 따른 휨모멘트의 평균 감소속도는 약 $0.1t \cdot m/m$ 로 나타났다.
- (5) 굴착과정 및 굴착직후에 간극수압은 급격하게 감소하였으며, 굴착동안의 배면측의 배수속도는 근입깊이비가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 간극수압은 깊이에 따라 선형적으로 변화하고, 실험종료시 간극수압은 정수압상태에 근접하였다.

참고 문헌

1. 이치근, 안광국, 허열(2000), "화강토 지반상에 시공되는 Diaphragm Wall의 거동에 관한 원심모형 실험", *대한토목학회 논문집*, 제20권, 제1-C호, pp.47~57.

2. Bolton, M. D., and Powrie, W. (1988), "Behaviour of Diaphragm Walls in Clay prior to Collapse", *Geotechnique*, Vol.38, No.2, pp.167~189
3. Bolton, M. D., and Stewart, D. I. (1994), "The Effect on Diaphragm Walls of Rising Groundwater in Stiff Clay", *Geotechnique*, Vol.44, No.1, pp.111~127.
4. Fourie, A. B., and Potts, D. M. (1989), "Comparison of Finite Element and Limit Equilibrium Analyses for an Embedded Cantilever Retaining Wall", *Geotechnique*, Vol.39, No.2, pp.175~188.
5. Gourvenec, S.M., and Powrie, W. (1999). "Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Diaphragm Wall Installation", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.801~823."
6. Kim, Hak-Moon(1990), "The Theoretical and Site Behavior of a Braced Diaphragm Wall-A Comparison", Korean Society of Geotechnical Engineering.
7. King, G. J. W., and McLoughlin, J. P. (1993), "*Centrifuge Model Studies of a Cantilever Retaining Wall in Sand, Retaining Structures*", Printed by Galliard Ltd , pp.711~720.
8. Kusakabe, O. (1982), "Stability of Excavation in Stiff Clays", Ph.D Dissertation, Cambridge University.
9. Ng, C.W W., and Yan, R.W.M (1999), "Three-Dimensional Modelling of a Diaphragm Wall Construction Sequence", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.825~834
10. Poh, T. Y., Wong, I. H., and Goh, A.T.C. (1999), "Performance of a Propped Diaphragm Wall in Stiff Residual Soils", *Proceeding of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Singapore, pp.223~228.
11. Powrie, W. (1986), "The Behaviour of Diaphragm Walls in Clay", Ph.D Dissertation, Cambridge University.
12. Powrie, W. (1996), "Limit Equilibrium Analysis of Embedded Retaining Walls", *Geotechnique*, Vol.46, No.4, pp.709~723.
13. Powrie, W. (1997), "*Soil Mechanics: Concepts and Applications*", E & FN Spon, pp.233~280.
14. Powrie, W., and Li, E. S. F. (1991), "Finite Element Analyses of an In-Situ Wall Propped at Formation Level", *Geotechnique*, Vol.41, No 4, pp.499~514.
15. Tedd, P., Chard, B. M., Charles, J. A., and Symons, I. F. (1984), "Behaviour of a Propped Embedded Retaining Wall in Stiff Clay at Bell Common Tunnel", *Geotechnique*, Vol.34, pp.513~532.

(접수일자 2000. 7. 21)