

축소모형실험을 이용한 지반굴착시 주변 지반 거동 연구

Laboratory investigation on deep excavation-induced ground movements

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 이성우²⁾, Soung-Woo Lee, 이봉원³⁾, Bong-Won Lee

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사 과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

³⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사 과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

SYNOPSIS : This paper presents the results of small scale model tests on the behavior of propped wall and ground movements during deep excavation. Small scale model tests were performed in order to investigate the effects of various influencing factors on the deep excavation, such as stiffness of ground and unsupported span length. The results of model tests indicated that the wall behavior is significantly influenced not only by the stiffness of ground but by the over-excavation, and that the wall behavior can be reduced by decreasing the unsupported span length and increasing the stiffness of ground.

Key words : deep excavation, propped wall, stiffness of ground, unsupported span length

1. 서 론

도심지에서 토지 활용의 극대화를 위한 방안으로 구조물에 인접하여 대규모, 대심도의 굴착공사를 수행할 때 토류 구조물 자체의 안정성 확보와 인접지반 및 구조물에 대한 영향 정도를 판단하기 위해서는 굴착 공사로 인하여 발생하는 흠막이 벽체 변위와 지반 거동에 대해 정확하게 파악해야 한다.

일반적으로 굴착 공법에 따른 인접 지반의 변위 예측은, 굴착에 따른 흠막이 벽체 변위를 통해 간접적으로 추정하는 방법을 택하고 있으나 이러한 흠막이 구조물 설계시, 벽체 변위 예측 방법 또한 탄소성해석법, 유한 요소법, 유한 차분법 등을 이용해 이루어지고 있으며, 시공 중에는 계측을 통해 발생하는 변위에 따른 흠막이 구조물의 안정성을 평가하고 있다. 그러나 위에 언급한 흠막이 벽체 변위 예측 방법들은 다양한 특성을 지닌 현장 여건을 제대로 반영하기 어려운 근본적인 문제점으로 인해 예측된 변위와 실제 시공시 발생하는 변위와는 차이가 있다.

흠막이벽체의 효율적인 설계를 위해서는 굴착시 발생하는 벽체 거동과 지표 침하에 대하여 정확히 예측하는 것이 필수적이며, 단계적인 굴착에 따른 벽체 거동과 이에 따른 지표 침하 역시 사전에 정확하게 예측되어 설계에 반영되어야 한다.

그러므로 다양한 특성을 지닌 현장 여건을 반영하여 굴착시 발생하는 흠막이 벽체 변위와 지반 거동에 관한 연구의 일환으로 축소모형실험을 수행 하였다. 축소모형실험을 실시하여 흠막이 벽체 변위와 지반 변위에 대한 매개 변수 연구를 통해 벽체 변위와 지반 거동에 대한 정성적, 정량적 분석을 수행하였다.

2. 지반굴착시 주변지반 거동에 관한 기존 연구

굴착대상 지반이 중간~조밀한 모래 지반과 단단한 점토가 있는 모래 지반에서 시공 수준이 중간~양호한 일 때, 현장 측정 결과로부터 굴착에 따른 인접 지표의 침하 포락선으로서 최대 침하량은 토류벽 부근에서 약 0.3%H(H:굴착깊이), 최대 침하 영향거리는 토류벽으로부터 2.0H이다. 이 때 침하곡선은 모든 굴착 단계에서 곡선의 기울기가 토류벽쪽으로 갈수록 급하게 나타나는 형태를 띄고 있다(O'Rourke 1975).

계측 데이터와 비교 분석하여 지표침하 유형을 측정하는 방법으로 침하곡선을 포물선으로 가정하여 벽체 수평 변위, 흙의 수평 변위에 의해 발생하는 부피를 측정하고 영향 범위를 계산하여 침하 곡선을 예측한다. 또한 최대 지표 침하는 벽면에서 발생한다고 가정하였으며 결과적으로 최대 지표 침하량은 $\delta_{vm}=4V_s/D$ 만큼 발생한다(Bowels 1988).

흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 평균적으로 굴착 깊이(H)의 0.2%, 최대 침하량은 평균적으로 굴착 깊이의 0.15%이며 이때 침하량보다 수평 변위가 큰 값을 보이고 있다. 또한 토류벽의 형태가 상이해도 최대 수평, 수직변위에는 큰 차이를 보이지 않는다. 모래와 조립토로 형성된 지반에서는 최대 지표 침하량은 0.3%H 이내, 최대 침하 영향거리는 토류벽으로부터 2H이며, 단단한 점토지반에서의 최대 지표 침하량은 0.3%H 이내, 최대 침하 영향거리는 3H이며 침하량의 분포는 토류벽에서 떨어짐에 따라 감소하는 삼각형 분포를 나타낸다(Clough 1990).

평면 변형을 조건 아래에서 굴착으로 인하여 흙의 재평형이 이루어질 때까지 발생하는 지표 침하와 토류벽의 수평 변위를 분석한 결과, 토류벽의 최대 수평 변위 발생 위치는 굴착 바닥 근처이며 그 크기는 0.2%H~0.5%H의 범위에 있으며 최대 지표 침하량의 상한선은 토류벽의 최대 수평 변위와 동일하지만 대부분의 경우 최대 지표 침하량은 토류벽 최대 수평 변위의 0.5~0.7배의 범위에 있다.

현장 계측 데이터 결과로부터 굴착하는 동안 대표적으로 2가지의 일반적인 침하 현상이 있다. 첫째, 토류벽에서 일정 거리만큼 떨어진 곳에서 최대 침하가 발생하는 경우, 둘째, 토류벽에 거의 인접한 부근에서 최대 침하가 발생하는 경우로 나눌 수 있다. 첫째, 후속 굴착 단계와 비교했을 때 초기 굴착 단계에서 비교적 작은 토류벽 수평 변위와 지표 침하가 발생한 경우에 해당되며, 둘째, 초기 굴착 단계에서 비교적 큰 토류벽의 수평 방향 변형이 발생할 때 토류벽 가까이에서 큰 지표침하로 이어질 수 있는 경우에 해당된다(Ou 1993).

굴착에 의한 침하 유형에는 첫째, 토류벽에서 일정 거리만큼 떨어진 곳에서 최대 침하가 발생하는 경우와 둘째, 토류벽에 인접한 부근에서 최대 침하가 발생하는 경우가 있다. 이와같은 두가지 침하유형의 예측 방법을 제시하였는데, 유한요소 방법은 벽체 변위를 정확하게 예측할 수 있으나 침하 예측에는 부정확하다. 그러므로 흙의 거동을 모델링하거나, 벽체와 흙의 경계면을 규명하고 흙의 특성을 선정하는데 어려움이 있다. 하지만 실험에 의한 방법은 지표 침하를 잘 반영하며, 실험의 가장 큰 장점은 지반조건과 유사하게 지반을 조성할 수 있다고 하였다.

지표 침하의 형태는 벽체 변위가 과다하게 발생하고, 벽체 변위가 굴착양에 비해 상대적으로 작으면 벽체 변위가 캔틸레버형태의 변형을 일으키며 지표변위는 토류벽에서 일정 거리만큼 떨어진 곳에서 최대 침하가 발생하는 형태를 나타내게 된다. 또한, 첫 번째 굴착 단계이후 깊은 곳에서의 굴착이 이루어질 때에 벽체 변위보다 비교적 적은 벽체 변위가 첫 번째 굴착단계에서 일어나고 벽체 변위가 캔틸레버 형태이면 토류벽에 인접한 부근에서 최대 침하가 발생하는 침하 형태의 지표 침하가 이루어진다. 그러나 이들은 두 번째 침하영역을 고려하지 않았다는 단점이 있다.

제한한 방법의 신뢰는 벽체의 최대 수평 변위와 최대 지표 침하에 관련이 있으며 벽체 최대 수평 변위는 수치해석을 통하여 얻을 수 있으며 $\delta_{vm}=0.58\delta_{vm} \sim 0.75\delta_{vm}$ 의 범위 안에 있다. 침하유형은 캔틸레버 면적과 벽체 변형에 의한 안쪽 면적과의 관계에 의해 정해진다(Hsieh 1998).

3. 모형 실험

3.1 모형토조 제원 및 구성 요소

지반굴착에 따른 주변지반의 거동에 대한 경험적 혹은 반경험적 식들은 벽체의 변위 및 주변지반의 침하와 영향범위를 포함하고 있다. 따라서 모형실험은 이들 기존의 이론을 확인할 수 있는 크기로 하는 것이 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있으나 무한히 크게 조성할 수는 없으므로 실내에서 작업이 가능한 범위에서 토조를 제작하여야 한다. 지반의 굴착에 따른 주변지반의 침하 영향 범위에 대해 현장계측 자료로부터 모래지반의 경우 굴착 깊이의 2배 정도이다(Clough 1990).

이들의 연구결과와 축소비(1/20)을 감안하여 모형실험에서 굴착 깊이를 90cm로 할 때 모형 토조는 침하의 영향범위를 관찰할 수 있도록 그림 1과 같이 180cm(길이)×120cm(높이)×30cm(폭)이며 모형 토조는 굴착에 따른 지반거동이 관측 가능하도록 4면이 투명한 아크릴로 제작하였다.

굴착을 용이하게 하며 Plane strain조건에 부합하도록 두께 22mm 아크릴 판을 토조 전면부와 결합하여 굴착을 모사하였다. 또한 Strut은 길이 조절이 가능하고 Strut의 위치변화를 모사하기 위하여 그림 2와 같이 제작하였다. 흙막이 벽체는 두께가 3mm인 아크릴을 사용하였으며, 벽체의 휨강성은 벽체를 단순지지 시키고 지점 중앙부에 집중하중을 재하하여 작용하중에 대한 처짐량을 측정하여 아크릴 벽체의 휨강성($7.42 \times 10^{-4} \text{t}\cdot\text{m}^2/\text{m}$)을 산정하였다.

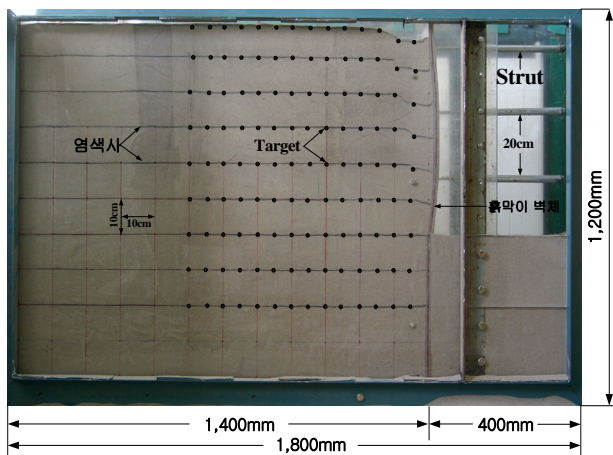


그림 1. 모형토조 제원 및 구성요소

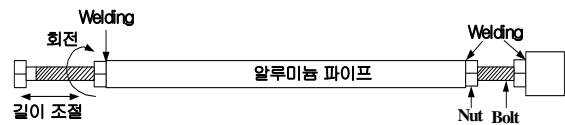


그림 2. Stur 설계 및 제작

3.2 계측

본 실험에서는 지반굴착에 따른 흙막이 벽체의 수평변위와 지반의 침하를 각 굴착단계에 대하여 연속적으로 측정되어야 한다. 따라서 계측 데이터 분석은 사진계측을 이용하여 굴착 및 Strut 설치시 흙막이 벽체의 수평변위, 지반침하를 고정된 위치에서 촬영하여 AutoCad 2000에 Uploading하여 각각의 변위를 분석하였다. 지반침하하는 배면에 10cm 간격으로 염색사를 포설하였으며, 흙막이 벽체로부터 5cm간격으로 Target을 설치하여 지중변위를 분석하였다. 흙막이 벽체는 사진계측시 토조 전면부와 구분을 하기 위하여 아크릴 벽체 양단에 색을 입혀 구분을 하였다.

3.3 실험 조건

그림 3은 축소모형실험을 이용하여 지반 굴착시 흙막이 벽체와 지반 거동에 관한 영향인자를 연구 하기 위한 실험 조건을 나타낸다. 초기 무지보 굴착 깊이(H_{un})에 대한 영향, 무지보 굴착 깊이(L)에 대한 영향, 지반 강성(D_r)에 대한 영향력 평가에 대한 실험을 수행하였다.

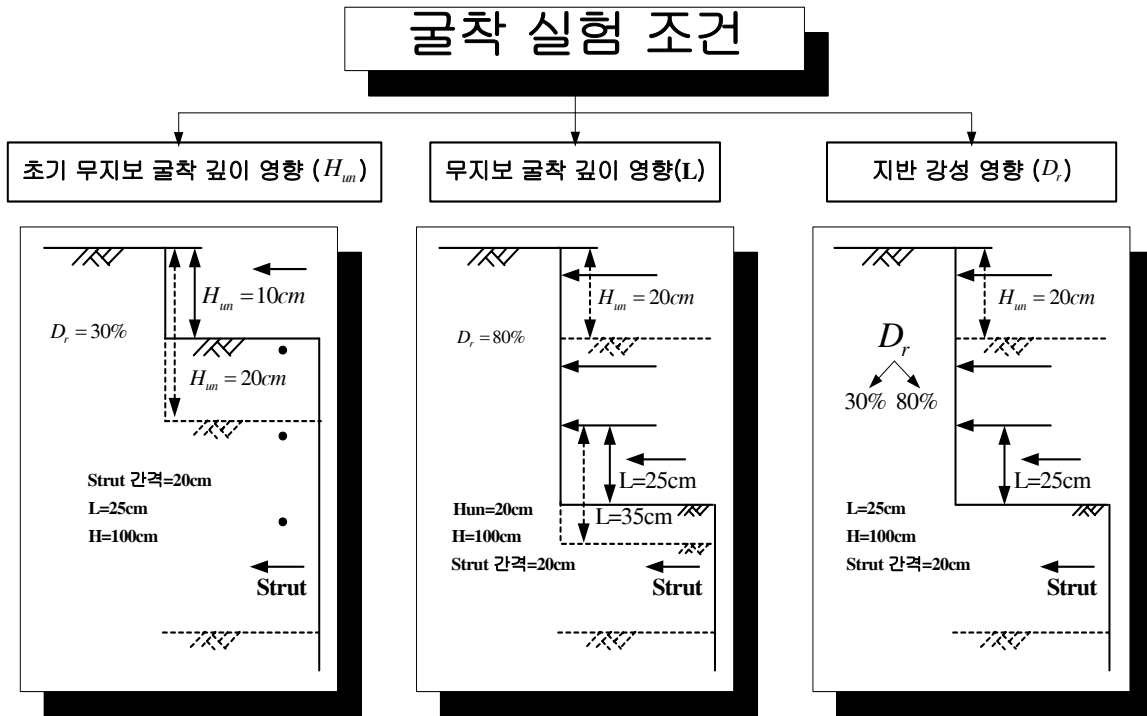


그림 3. 굴착 모형 실험 조건

4. 결과 분석

4.1 지반거동 메카니즘

굴착 공사로 인해 발생하는 지표 변위는 지보재 설치 이전의 캔틸레버 유형의 벽체 변위에 영향을 받는 캔틸레버 굴착 단계와 그 이후 지보재와 굴착 저면 사이의 측방 배부름 유형의 벽체 변위에 영향을 받는 측방 배부름 단계의 변위로 나누어진다.

그림 5는 단계별 굴착에 의한 벽체 변위 및 지표 변위 분포를 나타내고 있으며, 초기 무지보 굴착 단계에서 발생한 최상단 벽체 변위는 이후에 이루어지는 무지보 굴착에 의한 벽체 변위에 영향을 준다. 또한 지표 침하는 초기 무지보 굴착을 수행 할 때 최대 침하의 60% 이상이 발생하며 지반 거동은 수직, 수평 방향으로 발생한다. 이러한 현상은 배면의 지반 조성을 $D_r = 30\%$ 로 조성하여 지반의 전단강도가 작고, 느슨한 지반이므로 체적이 감소하여 발생한다고 할

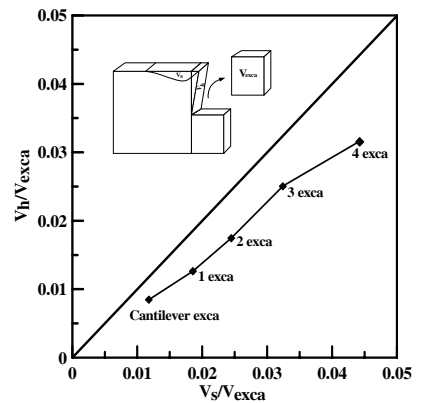


그림 4. V_s vs V_h

수 있다. 그림 5에서와 같이 초기 굴착 깊이를 크게 하였을 경우 벽체 변위가 과다하게 발생하여 초기에 V_h 가 크게 나타났으나 단계별 굴착을 수행하는 동안 벽체 변위는 지보재에 의해 억제 되고, 반면 지반의 강성이 작으므로 지표 침하 영향 범위는 커져 그림 4와 같이 벽체의 체적 변화 보다 지반 손실이 더 커지는 경향을 나타냈다.

현장에서 굴착 공사를 수행 할 경우 초기 무지보 굴착깊이가 커지면 흠막이 벽체 변위도 크게 발생하며, 굴착 배면 지반의 전단 강도가 작을 경우 초기 침하가 크게 발생하므로 작업 효율을 높이기 위하여 초기 굴착 깊이를 과도하게 깊게하는 것은 흠막이 벽체 변위를 증가시킬 뿐 아니라 지반 침하를 유발할 수 있으므로 주위를 기울여야 한다.

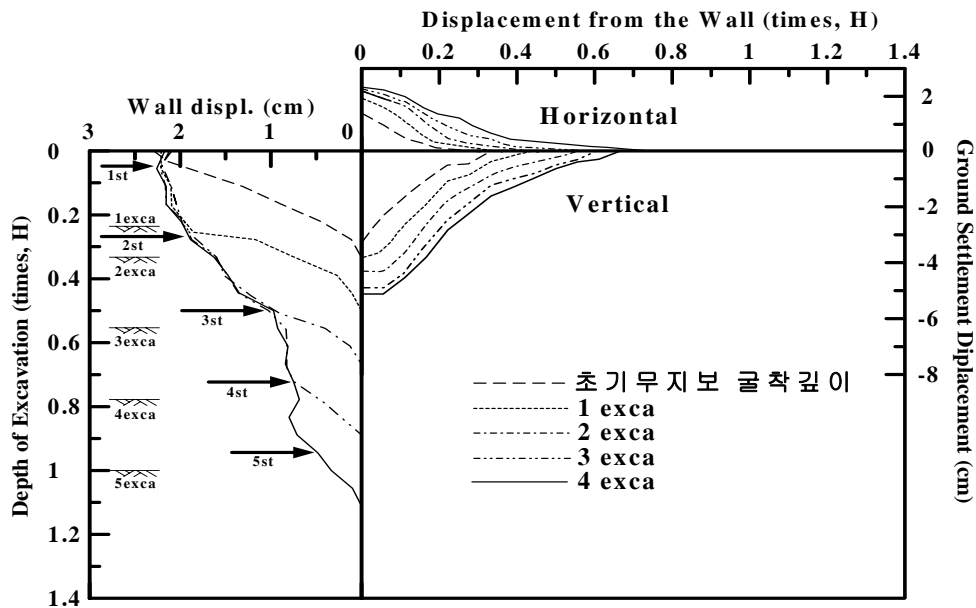


그림 5. 단계별 굴착에 의한 벽체 변위 및 지표 변위 분포

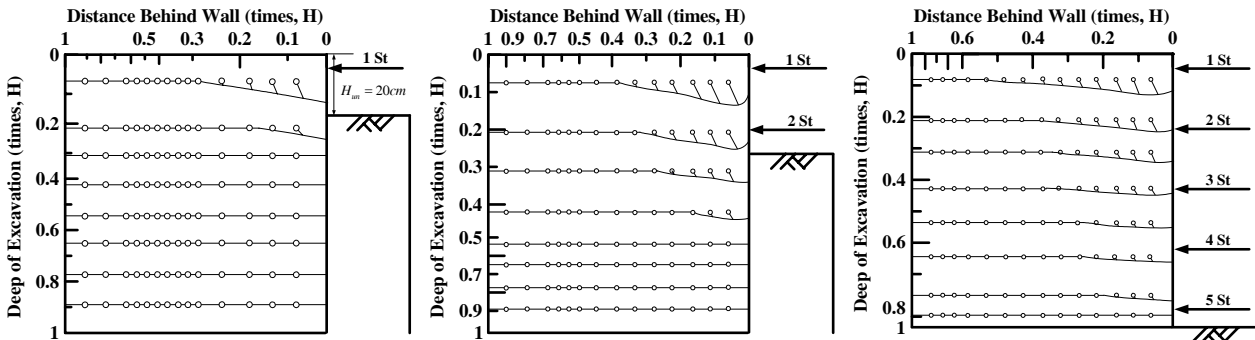


그림 6. 굴착 단계별 지중 변위 백터

4.2 초기 무지보 굴착 깊이에 의한 영향

초기 무지보 굴착 깊이에 대한 영향을 분석하기 위하여 H_{un} 을 10cm, 20cm로 변화하여 실험을 수행하였다. 그림 8은 $H_{un} = 20cm$ 일 때의 벽체 변위와 지표 변위를 나타낸 것이며, 그림 9는 $H_{un} = 10cm$ 일 때의 벽체 변위와 지반 변위를 나타낸 것이다. H_{un} 이 클수록 벽체 최상단의 변위에 큰 차이를 나타내며, H_{un} 이 작은 경우 벽체 변위와 지반 침하도 작게 발생하여 H_{un} 이 클 경우보다 V_s 와 V_h 가 작아지는

경향을 그림 7에서 알 수 있다. H_{un} 이 클 경우 벽체와 지반의 마찰력의 작용보다 지반의 거동이 더 크기 때문에 지표 침하 형상은 삼각형의 형태를 나타내며, H_{un} 이 작을 경우는 초기 지반의 거동이 작고 벽체 변위가 작기 때문에 벽체와 지반 사이에 마찰력으로 인하여 배면의 지표 침하는 토류벽에서 일정 거리만큼 떨어진 곳에서 최대 침하가 발생하는 포물선 형태를 나타내고 있다.

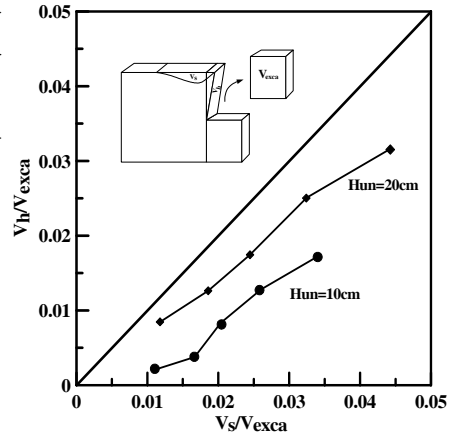


그림 7. V_s/V_{exca} VS V_h/V_{exca}

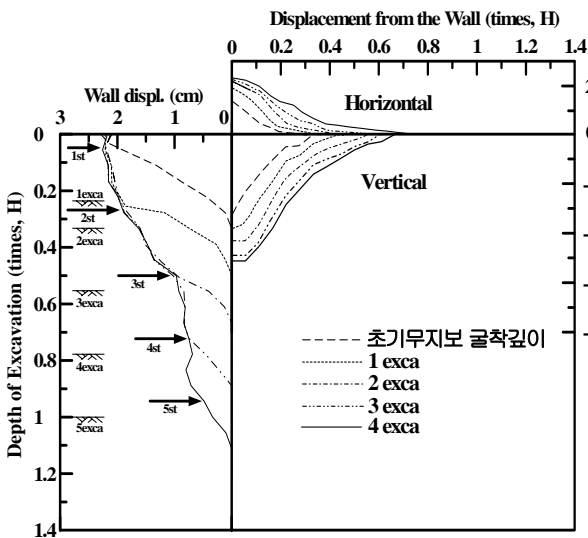


그림 8. $H_{un} = 20cm$

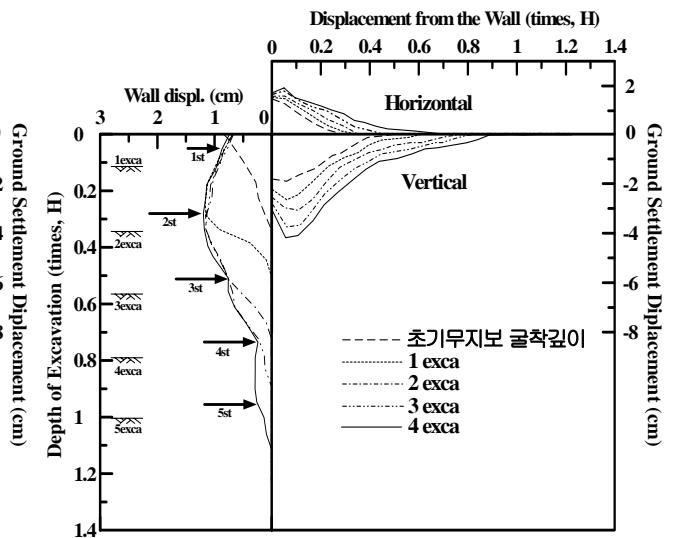


그림 9. $H_{un} = 10cm$

4.3 무지보 굴착 깊이에 의한 영향

무지보 굴착 깊이에 대한 영향을 분석하기 위하여 L 을 25cm, 35cm로 변화하여 실험을 수행하였다. 그림 11은 $L = 25cm$ 일 때, 그림 12는 $L = 35cm$ 일 때의 벽체 변위와 지표 변위를 나타낸 것이다.

H_{un} 이 동일하므로 초기 벽체 변위는 유사하게 나타났으며, 무지보 굴착 깊이가 커지면서 벽체의 측방 배부름 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 지표 변위는 무지보 굴착 깊이가 커지므로 최대 지표 침하가 과다하게 발생하며 초기 무지보 굴착을 수행하면서 발생한 지표침하는 지반 강성이 크기 때문에 최대 지표 침하에 20%정도 발생하였다.

또한 벽체와 지반의 경계 부분에서의 지표 변위도 상이한 현상을 나타내고 있으며, 이러한 현상은 초기 무지보 굴착이 이루어지

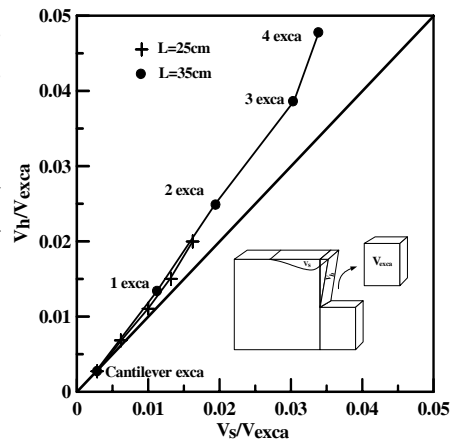


그림 10. V_s/V_{exca} VS V_h/V_{exca}

고 과도한 무지보 굴착을 수행할 경우 지반의 침하가 크게 발생함으로 지표 침하의 유형이 다르게 나타나는 것이다. 그림 10과 같이 무지보 굴착 깊이가 커지면서 벽체의 측방 배부름이 커지기 때문에 V_h 가 증가하며 굴착 배면의 지반 강성이 크기 때문에 굴착으로 인한 침하 영향 범위가 작아 V_s 가 작게 나타난다.

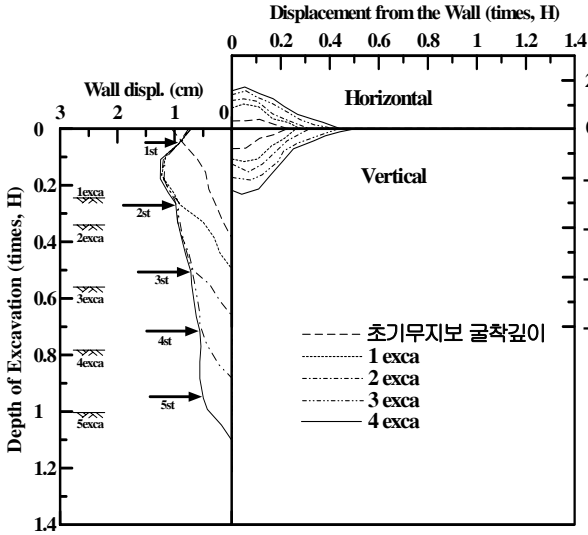


그림 11. $L = 25cm$

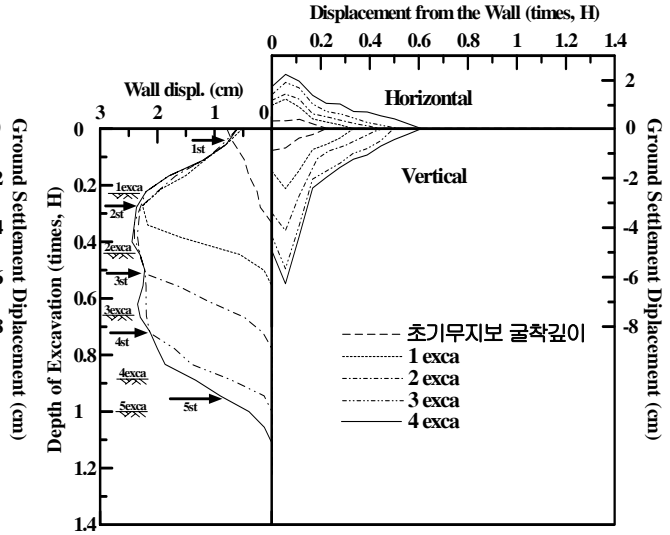


그림 12. $L = 35cm$

4.4 지반 강성에 의한 영향

지반 강성에 대한 영향을 분석하기 위하여 D_r 을 30%, 80%로 변화하여 실험을 수행하였다. 그림 15와 같이 지반의 전단강도가 크기 때문에 초기 무지보 굴착을 수행하였을 경우 벽체 변위는 작게 나타나며, 지반 거동은 거의 없기 때문에 지표 침하 뿐 아니라 벽체 변위 또한 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

이러한 원인은 굴착을 수행하는 동안 지반이 느슨한 경우 지반이 파괴되면서 체적이 감소하는 경향을 나타내므로 지표 침하와 벽체 변위가 조밀한 지반에서 보다 크게 발생한다. 그림 13과 같이 $D_r = 80\%$ 일 경우 $D_r = 30\%$ 인 경우보다 지반 손실율은 작고 벽체 체적 변화는 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 지반의 전단 강도가 크면 지반침하의 작게 일어나는 반면 배면 토압의 증가로 인하여 V_h 가 상대적으로 크게 발생하기 때문이다.

동일한 굴착 현장이라도 대상 지반의 전단 강도가 클 경우 V_s 보다 V_h 가 과도하게 커지므로 벽체의 휨강성은 큰 것으로 사용하여야 한다.

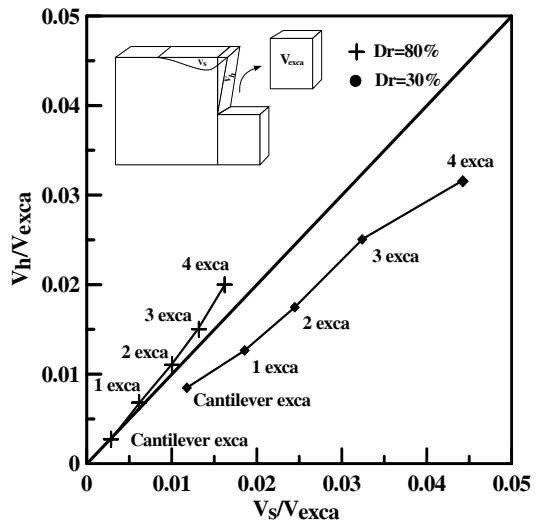


그림 13. V_s/V_{exca} vs V_h/V_{exca}

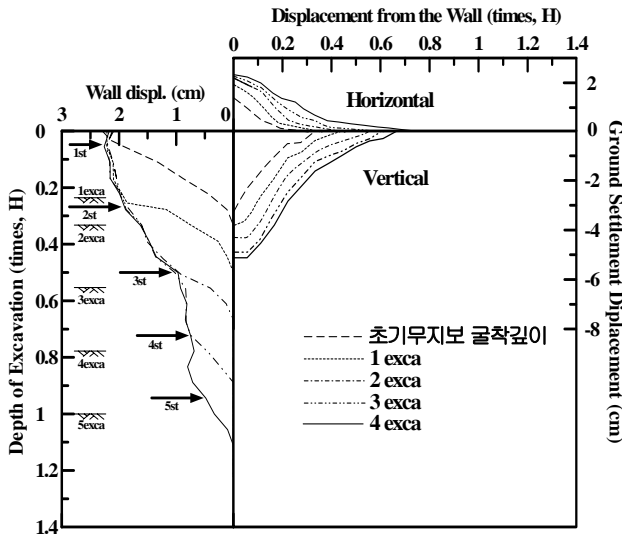


그림 14. $D_r = 30\%$

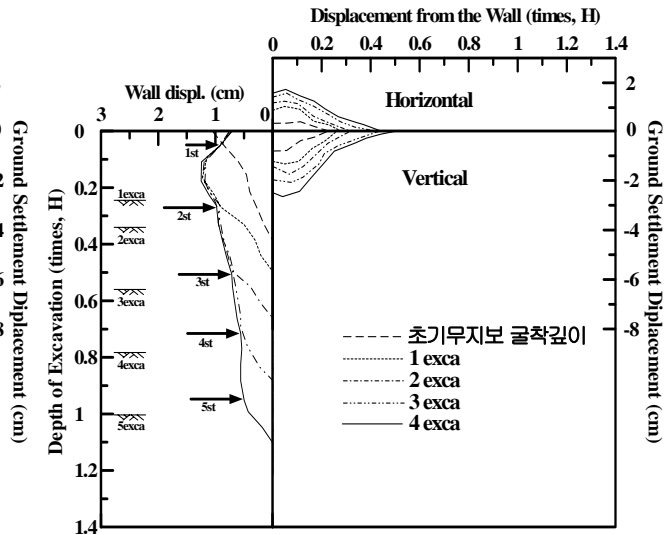


그림 15. $D_r = 80\%$

참고문헌

1. Chungsik Yoo(2001), "Behavior of Braced and Anchored Walls in Soils Overlying rock", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127 pp.225~33
2. Chang-Yu Ou, Pio-Go Hsieh, and Dar-Chang Chiou(1993), "Characteristics of ground surface settlement during excavation" *Can Geotech. J.* Vol.30 pp.758~767
4. C. F. Leung, Y. K. Chow, and R. F. Shen(2000), "Behavior of Pile Subject to Excavation-induced soil movement" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, pp.947~954
5. Pio-Go Hsieh and Chang-Yu Ou(1998), "Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation" *Can Geotech. J.* Vol.35 pp.1004~1017
6. M. Hamza, A. Ata, and A. Roussin(1999), "Ground Movements Due to the Construction of Cut-and-Cover Structures and Slurry Shield Tunnel of the Cairo Metro" *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.14 pp.281~289
7. Michael Long(2001), "Database for Retaining Wall and Ground movements due to Deep Excavations" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127 pp.203~224