

도심지 버팀 굴착시 과도 변형 억제를 위한 효율적 소단

The Efficient Berms for Restraining Excessive Deformation Caused by Deep Excavations in Urban Area

양 구 승^{*1}

Yang, Ku - Seung

박 기 태^{*2}

Park, Ki - Tae

Abstract

The use of berms can be an effective method to restrain excessive movements of wall and ground caused by deep excavations in urban area. But generally in construction sites, no berm remains for the sake of construction convenience or the geometry and magnitude of remaining berm is determined by individual experiences due to scarce research results. In this research, laboratory model tests and numerical analyses are used mainly for sandy soils. And efficient berms for restraining excessive movements by deep excavations are analyzed. Model tests were performed for the cases of cantilever and braced wall excavations, and the behaviors of retaining wall were analyzed according to the geometry and magnitude of berms. And also, numerical methods were used for analyzing efficient berms which are available in the soil and construction conditions in urban areas of Korea.

요 지

도심지 근접 굴착시 과도한 굴착으로 인하여 지반 및 흙막이 구조물에 발생하는 과도한 변형을 억제하기 위해 굴착측에 어느 정도의 소단(berm)을 두어 시공하는 것은 매우 유용한 방법이 될 수 있다. 그러나 굴착 현장에서는 시공의 편의상 소단을 두지 않거나, 기존 연구 결과의 부족 등으로 인하여 현장 임의의 판단에 의해 소단의 크기와 형상을 설정하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 주로 사질토 지반을 대상으로 실내 모형 실험 및 수치해석적 방법을 활용하여, 굴착시 지반 및 흙막이 구조물의 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 소단에 대해 분석하였다. 즉 자립식 및 버팀대식 굴착에 대한 모형 실험을 실시하여 소단의 형상과 크기에 따른 흙막이벽의 거동을 분석하였다. 또한 수치해석적 방법을 활용하여 국내 도심지 버팀 굴착공과 유사한 지반 조건 및 시공 조건에서 활용할 수 있는 효율적인 소단에 대하여 분석하였다.

*1 정희원, 삼성물산 건설부문 기술연구소 수석연구원

*2 정희원, 삼성물산 건설부문 기술연구소 전임연구원

1. 서론

도심지 근접 굴착시 과도한 굴착으로 인하여 지반 및 흙막이 구조물에 발생하는 과도한 변형을 억제하기 위해 굴착측에 어느 정도의 berm(이하 小段이라 칭함)을 두어 시공하는 것은 매우 유용한 방법이 될 수 있다(양구승, 1996; 이종규, 1996; 石井 등, 1994).

국내 도심지 버팀굴착 공사시에는 그림 1에서와 같이 버팀대 설치 예정 위치에서 2.5m~3.5m 정도 더 굴착된 상태에서 버팀대를 설치해가는 것이 일반적이다. 이는 현장에서 굴착 및 스트럿 설치 작업을 위해, 중장비가 필요로 하는 작업 공간을 확보하기 위함인데, 이러한 경우 과도한 굴착으로 인하여 발생하는 지반 및 흙막이 구조물의 큰 변형을 억제하기 위해서 여러 가지 방법이 활용될 수 있다. 여러 가지 방법 중 소단(berm)이 현장의 여건에 적절하게 활용될 수 있다면 경제적이고 효과적인 방법이 될 수 있다. 한편 굴착 현장에서는 시공의 편의상 소단을 두지 않거나, 기존 연구 결과의 부족 등으로 인하여 현장 임의의 판단에 의해 소단의 크기와 형상을 설정하는 것이 일반적이다.

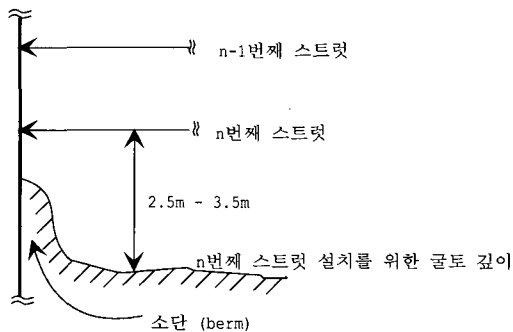


그림 1. 임의 단계에서의 일반적인 굴착 형상

Clough와 O'Rourke(1990)에 따르면 연약~중간 정도 굳기의 점토 지반보다는 사질토와 같은 단단한 지반에서 소단이 지보공을 보조하는 역할이 뚜렷한 것으로 알려져 있다. 또한 국내외에서도 소단을 남겨 놓음으로써 흙막이벽의 수평 변위를 상당히 억제한 사례를 종종 찾아볼 수 있다. 그러나 굴착 공사시 발생하는 과도한 변위를 억제하기 위한 효율적인 소단에 대해서는 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 주로 사질토 지반을 대상으로 실내 모형실험 및 수치해석을 실시하여, 굴착시 지반 및 흙막이 구조물의 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 소단에 대해 분석하였다.

즉 자립식 및 버팀대식 굴착에 대한 모형 실험을 실시하여 소단의 형상과 크기에 따른 흙막이벽의 거동을 분석하였다. 또한 수치해석적 방법을 활용하여 국내 도심지 버팀 굴착공과 유사한 지반 조건 및 시공조건에서 활용할 수 있는 효율적인 소단에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구 결과를 적절하게 활용한다면 도심지 깊은 굴착 공사시 보다 합리적이고 경제적인 설계와 시공이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

2. 모형실험

2.1 실험 장치

토조는 평면 100 cm×146.5 cm, 높이 100 cm의 크기이며, 측벽 및 전후벽은 20 mm 두께의 투명 아크릴판으로 구성하였고 변형의 가능성이 있는 양쪽 측벽에는 2열의 D자 형강을 보강하여, 변형을 억제하였다. 또한 사용하는 모래의 종류, 토조의 크기 및 기존의 실험 결과 등을 고려

하여 흙막이벽으로서 두께 3 mm의 아크릴판(EI : $6.08 \times 10^{-4} \text{ t} \cdot \text{m}^2/\text{m}$)을 이용하였다. 즉 굴착 과정에 따라 정성적, 정량적으로 연성벽체 거동의 결과를 얻을 수 있도록 흙막이벽 두께로서 3 mm를 선택하였다. 한편, 토조 내에 조성되는 지반은 전기모터로 작동하는 토사 포설기를 이용하였다. 즉 토조 위에 설치된 rail 위를 일정한 속도로 이동하는 강사장치(raining box)를 이용하여 매 실험마다 거의 동일한 지반 조건을 갖도록 지반을 조성하였다. 또한 좌우 측벽과 흙막이벽 측면을 약 5 mm 정도로 이격시킨 후, 흙막이벽 측면에 OHP film을 부착하여 마찰을 최소화하고 흙막이벽을 중심으로 배면측과 굴착측을 분리하였다. 스트럿 모형은 직경 8 mm의 강봉(단위 길이당 EA : $2.11 \times 10^3 \text{ t/m}$)으로 제작하였으며, 강봉은 원나사부와 오른나사부를 중앙의 결속체로 결합하여, 전체 길이를 효율적으로 조절할 수 있도록 하였다.

2.2 지반 조건 및 계측시스템

2.2.1 지반조건

토조 내에 조성하는 지반의 재료로서는 국내에서 일반적으로 많이 활용되는 주문진 표준사를 이용하였으며, 모래의 투입은 토조 바닥으로부터 108 cm 높이에 있는 강사 장치를 이용하여 수행하였다. 형성된 지반 조건을 파악하기 위해, 바닥면으로부터 0.0 cm, 21.0 cm, 47.5 cm, 70.0 cm, 82.5 cm, 90 cm의 각 높이에서 8개소씩 단위 중량을 측정하였다. 전체 48개소에서 측정한 단위 중량의 평균값은 1.62 g/cm^3 로 나타나, 본 시험 장치를 이용하여 조성한 지반의 단위중량은 일반적으로 주문진 표준사를 이용하여 형성한 것 중 최대 건조단위중량에 가까웠다. 이러한 결과는 낙하높이 뿐만 아니라 자동 포설기의 진동에 따른 다짐 효과에도 기인한 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서 조성된 모형 지반의 변형계

수를 찾기 위해 토조 내에서 공내재하시험(Pressuremeter Test, PMT)을 3회 수행하였다. 시험 결과, 모형 지반의 전단탄성계수는 1차 시험시 800 kPa, 2차·3차 시험시 1200 kPa로 각각 나타났다. 이러한 차이는 1차 시험의 경우 토조 내에 Probe를 설치한 후 곧바로 시험을 실시하였으나, 2차·3차 시험의 경우는 강사 후 6시간 정도 경과한 상태에서 시험을 실시한 점 등에 기인한다고 판단된다(측정 초기 압력, 1차 시험 : 0.0027 kg/cm^2 , 2차·3차 시험 : 0.0072 kg/cm^2).

2.2.2 계측 시스템

계측시에는 응력과 변위를 모두 측정하여 이를 비교, 분석하는 것이 일반적이나, 본 실험의 경우에는 흙막이벽의 수평변위를 중심으로 측정하였다. 본 실험에 이용된 계측기기의 상세 위치도 예(스트럿 지지 흙막이의 경우)는 그림 2와 같다. 실험 도중, 계측 자료는 1분마다 1회씩 저장하였으며 필요에 따라 실험도중에 중요 단계 별로 임의로 저장하는 방식도 병행하였다. 흙막이벽의 수평 변위 측정용 LVDT는 자립식 흙막이 실험의 경우에는 굴착측에 설치하였으나, 스트럿을 설치하는 경우에는 소단 형성을 위한 작업공간 확보를 위해 배면측에 설치하였다.

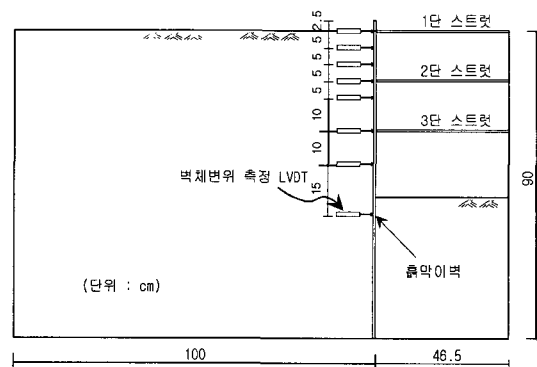


그림 2. 계측기기의 상세 위치도 예

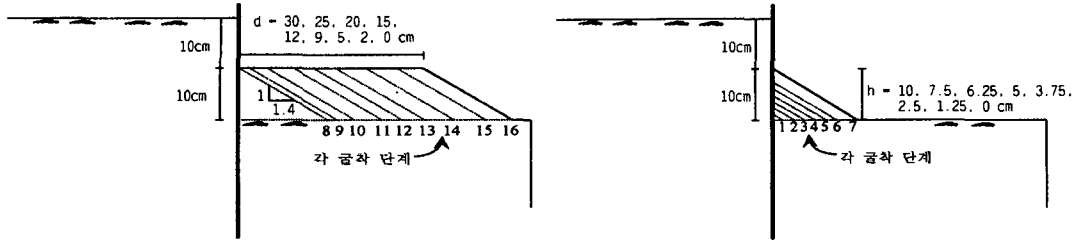


그림 3. 굴착에 따른 소단 형상의 변화(제 1 단계)

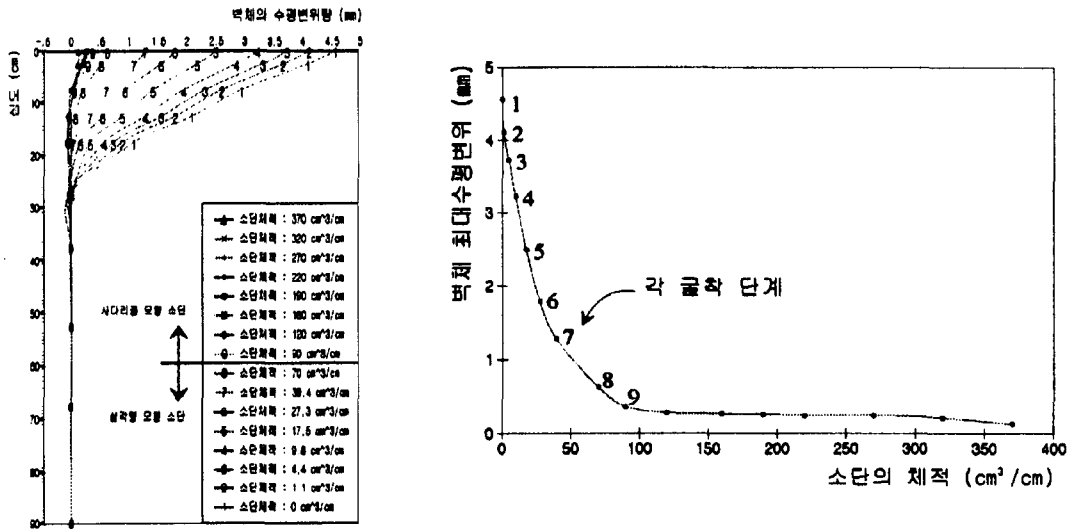


그림 4. 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평 변위의 변화(제 1 단계)

2.3 실험 결과 분석

2.3.1 자립식 흙막이

자립식 흙막이에 대한 실험은 제 1 단계, 제 2 단계로 나누어 시행하였으며, 실험 결과는 흙막이벽의 수평변위를 중심으로 분석하였다.

1) 제 1 단계

GL-10.0 cm까지 1 단계 굴착을 평평하게 완료한 후, 그림 3에서와 같이 높이 10 cm, 평균 기울기 1:1.4 정도로 소단의 형상을 유지하면서 소단의 전체 크기를 점점 축소시켜 나갔다. 이에 대한 기하학적 변화 형상은 그림 3에 나타나 있다 (굴착순서는 굴착단계 16 → 굴착단계 1).

그림 3에서와 같이 10 cm 굴착된 상태에서 10 cm의 소단 높이를 유지하면서 소단의 크기 변화에 따른 흙막이벽의 수평변위를 측정된 결과는 그림 4에 제시되어 있다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 굴착에 따라 흙막이벽은 캔틸레버 거동을 보이고 있으며, 동일한 굴착 심도에서 소단의 크기(단위 길이당 체적)가 감소함에 따라 흙막이벽의 수평변위는 증가하는 경향을 보이고 있다. 동시에 소단의 크기가 어느 값 이하로 줄어들어 따라 흙막이벽의 수평변위가 급속하게 증가하는 것으로 나타났다. 즉 이것은 개착 공사 초기에 지보공 없이 굴착을 하는 경우, 즉 흙막이벽이 캔틸레버 거동을 보일 때 벽체의 변형을 억제할 수 있는 효율적인 크기의 소단이 존재함

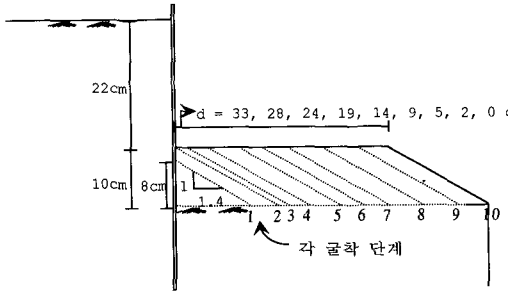


그림 5. 굴착에 따른 소단 형상의 변화(제 2 단계)

을 알려 주는 것으로 판단된다.

소단의 형상이 사다리꼴에서 삼각형으로 바뀌었을 때(소단 굴착 단계 9→8), 흙막이벽의 최대 수평변위는 0.63 mm로서 굴착 깊이, $H(=20\text{ cm})$ 의 0.32% 정도였다. 계속해서 이 삼각형의 크기를 점차로 축소시켰을 때 흙막이벽의 수평 변위는 급속하게 증가하여 소단이 완전히 제거된 상태에서는 $4.56\text{ mm}(=2.28\%H)$ 의 최대 수평 변위가 발생하였다(흙막이벽 머리에서 2.5 cm하부에 설치된 LVDT에서 측정된 값). 이와 같은 측정 결과로부터, 자립식 흙막이의 경우 흙막이벽에 바로 인접한 흙이 상당히 중요한 지지 역할을 할 수 있다고 판단된다.

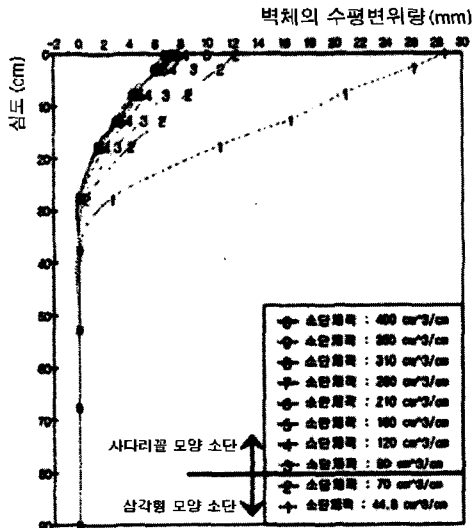


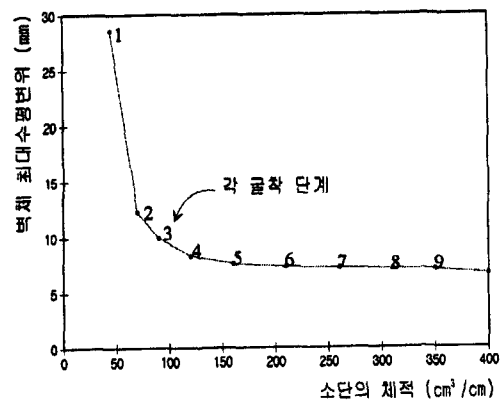
그림 6. 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평 변위의 변화(제 2 단계)

2) 제 2 단계

제 1 단계의 실험이 끝나고 약 17시간 정도 경과한 상태에서 제 2 단계 실험을 실시하였다. GL-22.0 cm까지 굴착면을 평평하게 한 후, 그림 5에서와 같이 높이 10 cm, 평균 기울기 1:1.4 정도로 소단의 형상을 유지하면서 소단의 전체 크기를 점점 축소시켜 나갔다. 시험 결과를 종합하면 그림 6과 같다.

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 제 2 단계 실험에서도 제 1 단계 실험에서와 유사한 경향을 얻었다. 즉 동일한 굴착 심도에서 소단의 크기가 줄어들수록 흙막이벽의 수평변위량은 점차로 증가하며, 어느 정도 이상으로 소단의 크기가 줄어들면 흙막이벽의 수평변위가 급속하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 바꾸어 말하면 자립식 흙막이 굴착에서 흙막이벽의 과도한 변형을 억제할 수 있는 효율적인 소단의 크기가 존재한다는 것을 재차 확인할 수 있었다.

또한 그림에서 3으로 표시된 시점은 사다리꼴 소단의 윗변이 2.0 cm로서 사다리꼴 형태로서는 마지막 크기인데 이 단계에서 흙막이벽의 최대 수평 변위는 10.03 mm로서 굴착 깊이, $H(=32$



cm)의 3.1% 정도이다. 한편 그림에서 2로 표시된 시점은 소단의 형상이 사다리꼴에서 삼각형으로 처음 바뀐 상태인데, 이 때의 흠막이벽 최대 수평 변위는 12.28 mm로서 굴착 심도의 3.8% 정도이다. 마지막으로 1로 표시된 시점은 소단 삼각형의 높이가 10 cm에서 8 cm로 줄어들었을 때(사면의 경사는 1:1.4로 유지)인데, 흠막이벽의 최대 수평 변위는 28.62 mm로서 굴착 깊이의 8.9%H를 나타내 갑작스런 변위의 증가를 보였다. 또한 이 순간에는 배면 지표측에 흠막이벽으로부터 8 cm 떨어진 위치에서 벽체와 나란하게 발생한 지표침하로 인한 단차가 확인되는 등 전단 파괴가 발생한 것으로 판단되었다. 그림에서의 점 1, 2, 3, 4를 참조했을 때 자립식 흠막이의 경우, 흠막이 구조물의 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 크기의 소단이 존재하며, 흠막이 벽에 바로 인접한 흠이 상당히 중요한 저항체 역할을 할 수 있다고 판단된다. 즉 자립식 흠막이 구조에서 굴착 바닥면과 흠막이벽 사이에 위치한 흠은 수동 저항체로서의 상당한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

앞에서의 제 1 단계, 제 2 단계 실험 결과로부터 자립식 흠막이(무지보 흠막이, 거동)의 경우 흠막이 구조물 및 지반의 과도한 변형을 억제할 수 있는 효율적인 소단캔틸레버식 이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 흠막이벽에 바로 인접해 있는 흠(사질토)은 저항체로서의 역할이 커, 제거되었을 때 상당한 변위 증가를 유발할 수 있다고 판단된다.

2.3.2 스트럿 지지 흠막이

스트럿 지지 흠막이 실험의 경우에도 자립식 흠막이 실험의 경우와 마찬가지로 일정한 굴토 깊이에서 소단의 크기를 변화시키며 실험을 진행하였다. 자립식 실험에서는 소단의 높이가 10 cm였던 것에 비해 본 실험에서는 스트럿이 있는

경우, 스트럿 설치 작업을 위해 중장비가 필요로 하는 작업 공간을 추가로 확보해야 하는 현장에서의 굴착상황을 고려하여 소단의 높이를 15 cm로 형성하였으며, 소단 경사면의 기울기, 소단 윗변 길이의 변화 등은 자립식의 경우와 마찬가지로 같다. 단계별 실험과정은 다음과 같다(그림 7 참조).

- A : GL-5 cm까지 굴착 후 배면지표와 동일한 높이에 1단 스트럿 설치
- B : 소단의 크기를 변화시키며 굴착을 진행하여 GL-20 cm까지 굴착완료
- C : 2단 스트럿 설치 전까지 굴착
- D : 2단 스트럿 설치 후 잔여 소단 제거
- E : 3단 스트럿 설치 전까지 굴착
- F : 3단 스트럿 설치 후 4단 스트럿 설치 전까지 굴착. 실험 완료

1) 1단 스트럿 설치 후의 실험

그림 7의 A~C 과정에서의 실험 결과는 그림 8과 같다.

전반적인 변위 양상은 1단 스트럿으로 인하여 흠막이벽 상단의 변형이 상당히 억제되어 있으며, 스트럿과 굴착 바닥면 사이에서 변위가 크게 발생하는, 사질토 지반에서의 버팀 굴착시 볼 수 있는 전형적인 inward bulging 상태이다. 1단 스트럿 설치 후에 동일한 굴착 심도에서 소단의 크기가 줄어들어 따라 흠막이벽의 수평변위량의 변화는 별로 나타나지 않았으나, 삼각형 모양의 소단이 형성된 후(소단 굴착 단계 7) 흠막이벽과 인접한 소단 부분을 줄여 나갈 때(소단 굴착 단계 7→6) 벽체의 수평변위가 뚜렷하게 증가하기 시작하였다. 이 때 벽체의 누적 최대변위는 0.31 mm로 굴착깊이(20cm)의 0.16%였다. 계속해서 GL-20 cm에서의 굴착을 완료했을 때 벽체의 누적 최대변위는 1.18 mm로 굴착깊이의 0.59%이며 스트럿이 설치된 위치에서는 0.82 mm의 변위가 발생하였다.

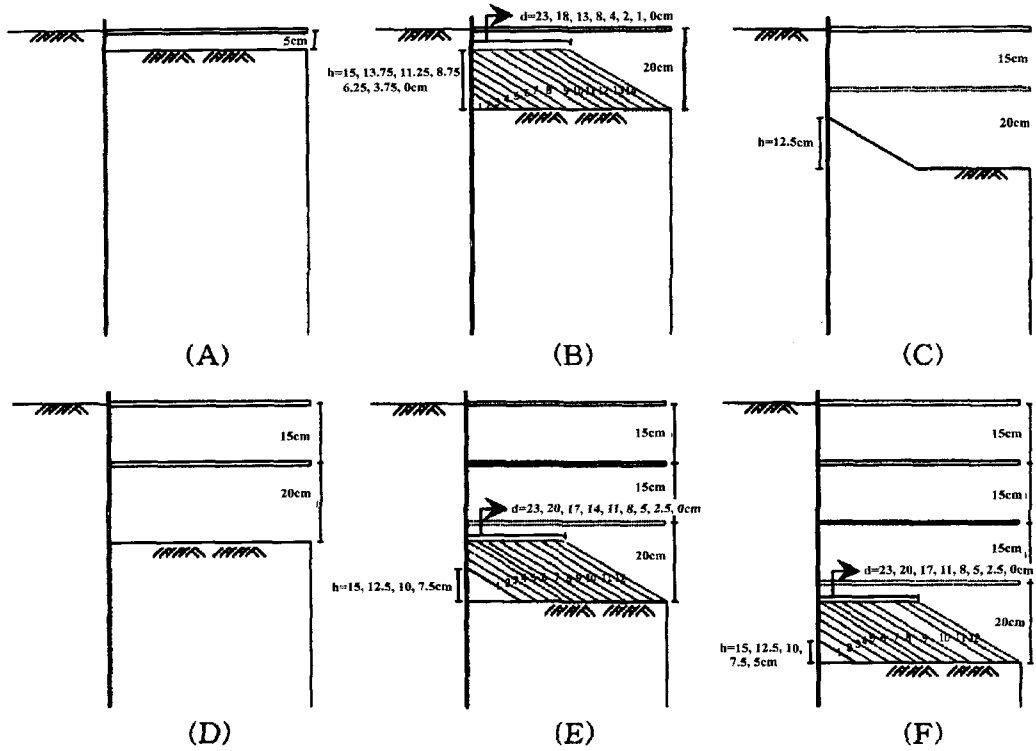


그림 7. 스트럿 지지 흙막이 실험의 순서

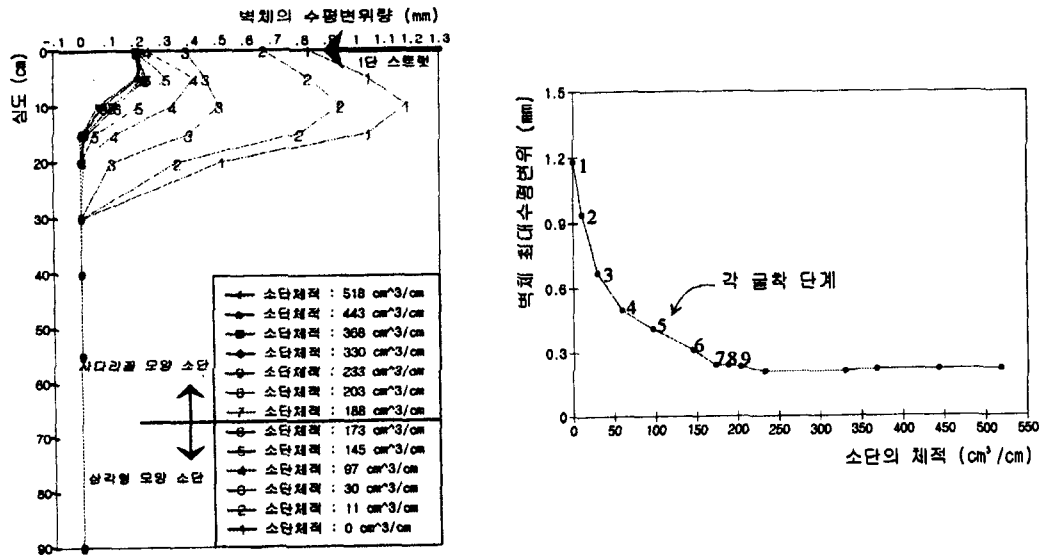
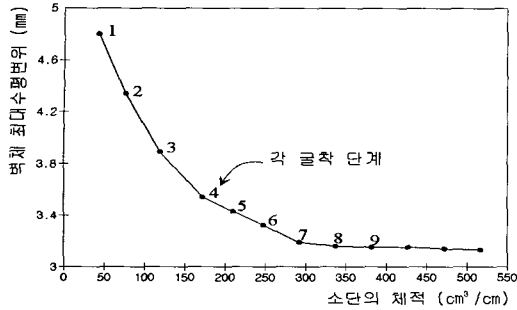


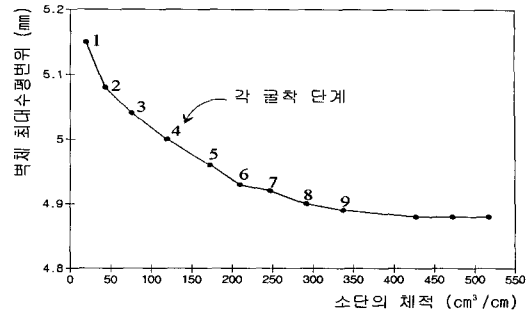
그림 8. 1단 스트럿 설치 후 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평 변위의 변화

자립식 흙막이에서의 실험과 마찬가지로 삼각형 모양의 소단이 형성되고 나서부터 소단의 크

기에 따른 벽체변위의 증가량이 매우 커지는 것을 볼 수 있는데, 이러한 사실로부터 흙막이벽에

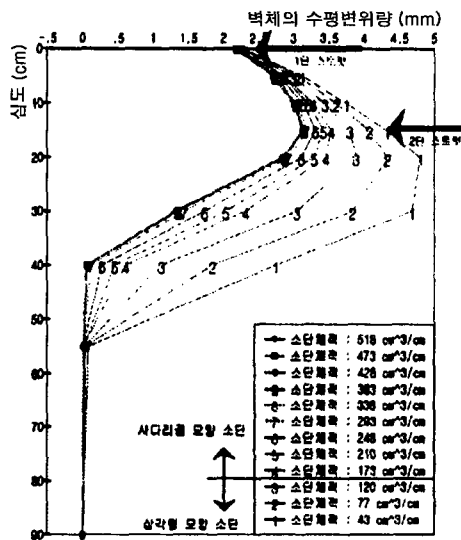


(a) 2단 스트럿 경우

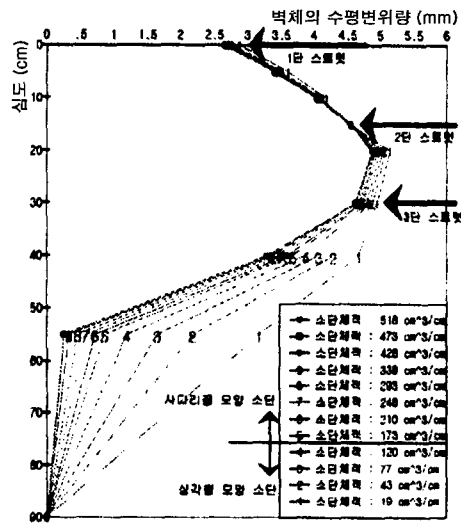


(b) 3단 스트럿 경우

그림 9. 2단, 3단 스트럿 설치 후 소단의 크기에 따른 흙막이벽 최대 수평변위의 변화



(a) 2단 스트럿 경우



(b) 3단 스트럿 경우

그림 10. 2단, 3단 스트럿 설치시 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평변위의 변화

인접한 흙은 적은 양이라도 저항체로서 큰 역할을 한다고 판단된다.

2) 2단, 3단 스트럿 설치 후의 실험

그림 7의 D~F 과정에서의 실험결과, 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평변위의 변화는 그림 9, 그림 10과 같다.

1단 스트럿이 설치된 상태에서의 실험 결과와 마찬가지로 전반적인 변위 양상은 2단, 3단 스트럿으로 인하여 흙막이벽 상부의 변형이 상당히 억제되어 있으며, 하단 스트럿과 굴착 바닥면 사

이에서 변위가 크게 발생하는, 사질토 지반에서의 버팀 굴착시 볼 수 있는 전형적인 inward bulging 상태를 역시 나타냈다(그림 10 참조).

2단 스트럿 설치 후에 소단의 크기를 줄이면서 굴착을 진행할 때, 그림 9(a)에서 알 수 있는 바와 같이 소단의 윗면 길이가 5cm인 시점(소단의 체적은 247.5 cm³)에서부터 벽체 수평변위가 급증하였다. 이 때 벽체 최대변위는 3.32 mm로 굴착깊이(35 cm)의 0.95%이다. GL-35 cm 굴착 완료시 벽체최대변위는 4.8 mm로 굴착깊이의 1.37%이고 1단 스트럿이 설치된 위치에서는 2.3 mm, 2

표 1. 수치해석에 사용된 지반의 물성치

지 층 \ 항목	단위중량 (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각* ($^{\circ}$)	Young 계수 (t/m^2)	Poisson비
매립토(GL-2.0m까지)	1.8	0.3	28	1500	0.40
풍화토(GL-15.0m까지)	1.9	0.5	30	1700	0.35
			32	2000	
			35	2500	
풍화암(GL-20.0m까지)	2.1	3	40	20000	0.30
연암(GL-20.0m이하)	2.3	6	42	60000	0.25

* 풍화토의 내부 마찰각은 다양한 경우를 고려하기 위해 30°, 32°, 35°의 3가지 경우를 각각 선정하였다.

단 스트럿이 설치된 위치에서는 4.3 mm의 변위가 발생하였다.

3단 스트럿 설치 후에 소단의 크기를 줄이면서 굴착을 진행할 때, 그림 9(b)에서 알 수 있는 바와 같이 소단의 윗변 길이가 11 cm인 시점(소단의 체적은 337.5 cm³)에서부터 벽체 수평변위의 증가 경향이 뚜렷하다. 이 때 벽체 최대변위는 4.9 mm로 굴착깊이(65 cm)의 0.75%이다. GL-65 cm까지 굴착을 완료했을 때 벽체 최대변위는 5.2 mm로 굴착깊이의 0.8%를 보였으며, 1단 스트럿이 설치된 위치에서는 2.9 mm, 2단 스트럿이 설치된 위치에서는 4.6 mm, 3단 스트럿이 설치된 위치에서는 5.0 mm의 변위가 발생하였다.

앞에서의 각 실험 결과를 종합하면 벽체의 수평변위가 급증하는 시점은, 1단 스트럿 설치 실험에서는 소단 체적이 150 cm³일 때, 2단 스트럿 설치 실험에서는 소단 체적이 250 cm³일 때, 3단 스트럿 설치 실험에서는 소단 체적이 338 cm³일 때를 전후하여 변위가 급변하였다. 즉, 굴착심도가 커질수록 흙막이벽의 과도한 변형을 억제하기 위한 소단의 크기도 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 3단 스트럿을 설치한 후에 굴착을 진행함에 따라 스트럿 설치 위치에서의 변위는 상대적으로 작게 나타났으나, 3단 스트럿과 벽체 하단 사이에서 많은 변위가 발생했다. 이 때 벽체의 하단부는 무지보 실험시와는 달리 수평방향의 이동을 억제할 수 있도록 한 결과, 그림 10에서와 같이 3단 스트럿과 벽체 하단 사이 많은 변

위가 나타났으나 하단의 hinge 효과로 인하여 붕괴 상태는 발생하지 않았다. 본 결과로부터 만약 흙막이 구조물의 강성이 충분하고, 벽체 근입부가 강도가 확보되는 암반과 같은 단단한 곳에 설치되었을 때, 굴착공사시 흙막이벽체 근입부 지점 효과의 중요성을 확인할 수 있었다.

3. 수치해석

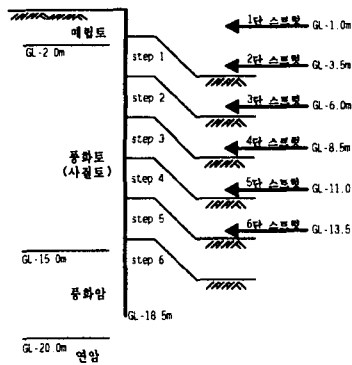
3.1 유한차분해석

국내 사질토 지반에서 일반적인 버팀굴착 공사시 소단에 따른 지반 및 흙막이 구조물의 거동에 대한 영향을 분석하기 위해 수치해석을 수행하였다. 해석은 2차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Ver. 3.3)을 이용하였으며, 지반을 모델링하는 구성방정식으로는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다.

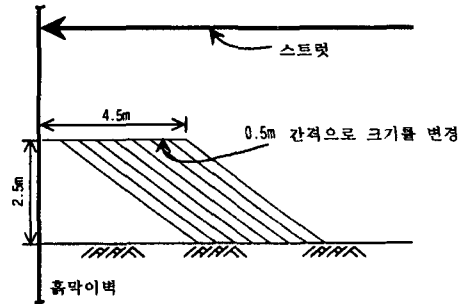
3.1.1 해석 대상 지반 및 흙막이 시스템

해석에 사용된 지반 및 흙막이 구조물의 조건으로서는, 국내 도심지 굴착시 흔히 접할 수 있는 경우를 설정하기 위해 서울 OO빌딩 현장 상황을 기본으로 활용하였다(양구승, 김명모 1997). 해석에 사용된 지반의 물성치는 표 1과 같다.

흙막이벽은 얽지말뚝-토류판으로 구성하였고, 얽지말뚝과 스트럿으로는 H 형강(H-300×300×10×15)을 사용하였다. 얽지말뚝과 스트럿의 수



(a) 굴착 단면도



(b) 임의 굴착 단계에서 소단의 변화

그림 11. 수치해석시의 굴착 상황도

평방향 설치간격은 각각 1.6m, 3.0m이며, 스트럿의 강성은 국내외 기존의 연구 결과를 참조하여 50% 감소시켜 적용하였다(O'Rourke, 1975; 양구승, 1996).

최종 굴착 깊이는 GL-16.5m이며, 엄지말쪽의 길이는 18.5m로서 굴착 바다면으로부터의 근입 길이는 2.0m이다. 스트럿은 제 1 단 스트럿이 GL-1.0m에 위치하고, 계속해서 연직방향 2.5m의 간격으로 설치되어, 총 6단으로 구성되어 있다. Potts 등(1993)에 따르면 소단의 높이가 2.5m 이상인 경우는 소단의 형상보다는 소단의 크기가 훨씬 큰 영향을 주게 된다는 점 및 국내 현장 상황 등을 고려하여 소단의 높이는 2.5m로, 소단의 경사각은 지반 조건 등을 고려하여 약 35° 정도로 설정하였다.

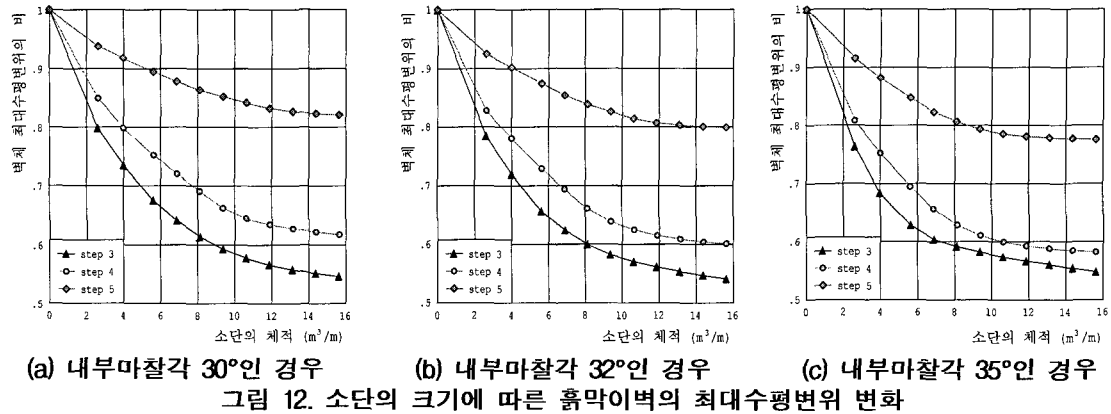
3.12 해석 결과

본 절에서는 사질토 지반에서의 국내 도심지 굴착시, 소단에 의한 영향을 분석하기 위해, 표 1의 지층 가운데 풍화토로 설정된 부분(매립토 및 풍화암 부분 제외)에서의 버팀 굴착시 다양한 크기의 소단 영향에 대해 분석하였다. 즉, 풍화토 구간에서 이루어지는 임의 굴착 단계에서 소단

윗변의 길이를 4.5m부터 0.5m 간격으로 줄여 가면서 소단 크기에 따른 흙막이벽의 최대 수평변위의 변화를 분석하였다(그림 11 참조).

분석 결과인 소단의 크기에 따른 흙막이벽 수평변위의 변화를 도시하고 있는 그림 12(a), 그림 12(b), 그림 12(c)는 지반의 내부 마찰각이 30°, 32°, 35°인 3가지 경우에 각각 해당하며, 각 그림에서의 step 3~step 5는 본격적인 사질토(풍화토) 구간에서의 굴착 단계에 해당한다(그림 11(a) 참조). 예를 들어 step 3은 2단 스트럿 설치후 3단 스트럿을 설치하기 위해 step 3에서 소단을 형성하면서 굴착을 수행하는 과정이다.

연직축의 값은 각 해석단계에서의 벽체 최대 수평변위를, 소단의 체적이 "0"일 때, 즉 소단이 없을 때 발생하는 흙막이벽의 최대수평변위로 정규화한 것이다. 제 2절에서의 모형실험 결과와 마찬가지로 3가지 경우 모두 소단의 크기가 점점 작아짐에 따라 벽체 최대 수평변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 소단 체적이 임의 값보다 작아지면 벽체 변위가 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 때 지반 조건 및 굴착단계에 따라 약간씩 차이가 있으나 전반적으로 7~10 m³/m 정도의 소단 크기를 중심으로 벽체 최대수



평변위의 증감이 뚜렷하게 달라지는 경향을 보이고 있다. 따라서 상대밀도가 중간 정도 이상인 국내 사질토 지반에서의 도심지 버팀 굴착시, 일반적인 공사 상황 등을 고려할 때, 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 소단의 크기로서 약 10 m³/m 정도(예 : 소단 높이 2.5m, 소단 윗변 길이 2.5m 정도 크기의 소단)를 기준으로 삼을 수 있다고 판단된다.

3.2 Coulomb의 시행 췌기법에 의한 분석

본 내용은 연성벽체의 저항을 증가시키는 안정화 소단(stabilizing berm)의 해석을 위해 제안된 방법 중(NAVFAC, 1982) 수개의 시행 파괴면에 대한 흙쇄기의 힘의 평형으로부터 수동토압을 산정하는 Coulomb의 시행 췌기법을 이용하여 분석한 것이다. 소단의 크기에 따른 수평저항(수동토압)의 변화를 파악하고, 이 결과로부터 주어진 조건하에서 효율적인 소단의 크기를 간접적으로 확인하고자 하였다.

그림 12에서와 같이 소단의 윗변 길이(소단의 크기)를 변화시키면서 각 경우에 대한 수동저항 값을 산정하였다. 이 때 소단 높이(h_b)는 3.0m, 가상지점의 위치(h_v)는 소단 아랫변과 흙막이벽의 교점에서 2.0m 아래, 소단의 경사면이 아랫변

의 수평면과 이루는 각도(i)는 흙의 내부마찰각과 동일한 안식각으로 가정하였다. 흙막이벽과의 마찰각은 흙 내부마찰각의 1/3(▲), 1/2(●), 2/3(■)인 경우로 각각 구분하였다.

해석결과 소단의 크기가 감소함에 따라 수동저항이 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있는데, 임의 크기의 소단을 중심으로 수동토압의 감소 정도를 나타내는 곡선의 기울기가 변화하였다. 즉, 이러한 경향은 다양하게 형성되는 소단 증 변형 억제를 위해 효율적으로 적용할 수 있는 소단이 존재한다는 것을 간접적으로 나타낸다고 판단된다(그림 13의 각 경우에서 A, B, C에 해당하는 소단의 크기).

또한, 보다 다양한 경우를 설정하여 앞에서와 마찬가지로의 방법으로, 국내 사질토 지반에서의 굴착공사시 적용할 수 있는 효율적인 소단 크기를 간접적으로 파악하기 위해, 내부마찰각이 각각 30°, 35°인 사질토 지반에서 소단 높이를 2.0m, 2.5m, 3.0m로 변화시키면서 수동저항에 대한 분석을 하였다(그림 14 참조). 18가지 경우에 대한 분석 결과, 효율적인 소단으로 판단되는 평균적인 크기는 단위 길이당 체적이 9.3 m³/m 정도로서, 앞의 3.1절에서 수치해석 결과 확인된 효율적 소단 크기인 7~10 m³/m와 유사한 값을 보이고 있다.

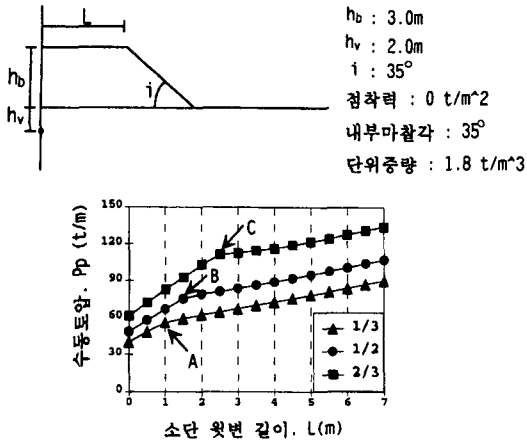


그림 13. 소단의 크기에 따른 수동토압의 변화

4. 소단 적용의 현장 분석 사례

본 내용은 실제 공사에서 잔류 소단을 단계적으로 굴착하여 소단의 크기가 흙막이 구조물의 거동에 주는 영향을 실측한 것으로, 일본 Obayashi Co.의 Yusuke Ishihi 등에 의해 수행된 것이다(石井 등, 1994).

지반 조건 및 흙막이의 개요는 그림 15와 같으며, 굴착 평면은 약 90m×90m의 정방형, 흙막이 벽은 Soil Cement 벽(벽두께: 550 mm, 응력재: H-450×200×9×14@450)으로 GL-23m까지 근 입되어 있다.

구 분	벽마찰각/내부마찰각, δ/ϕ	1/3	1/2	2/3
	소단 높이, h_b (m)			
case 1*	3.0	9.4	10.9	13.9
	2.5	8.2	9.5	10.7
	2.0	5.9	6.9	8.6
case 2**	3.0	10.8	12.3	12.3
	2.5	7.9	9.2	10.4
	2.0	6.5	6.5	7.5
전체 평균		9.3		

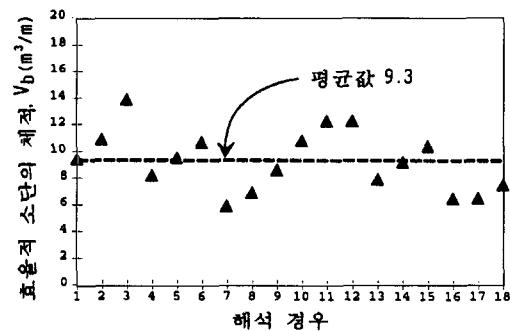
* : case 1은 $c=0t/m^2$, $\phi=35^\circ$, $h_v=2.0m$, $\gamma_t=1.8t/m^3$ 인 경우에 해당한다.

** : case 2는 $c=0t/m^2$, $\phi=30^\circ$, $h_v=2.5m$, $\gamma_t=1.8t/m^3$ 인 경우에 해당한다.

그림 14. 각 해석 경우에 대한 효율적 소단 크기, V_b (m^3/m)의 분포

잔류 소단의 상황은 그림 15의 우측 그림에 나타난 바와 같이 소단 길이 15.0m(수평부), 높이 3.3m로 부지 중앙부는 이미 최종 굴착이 완료되어 있다. 잔류 소단을 6 단계로 나누어 중앙부에서부터 순차적으로 굴착하여 그때의 흙막이벽 변형 및 스트럿 축력이 측정되었다.

잔류 소단의 굴착에 따른 흙막이벽 응력·변형의 깊이별 분포 및 3단 스트럿 축력의 경과시일에 따른 변화는 그림 16에 나와 있다. 여기서 흙막이벽의 응력·변형은 GL-12m, GL-14m 심도에서의 값을 나타내고 있다. 흙막이벽으로부터 잔류 소단 경사면까지의 수평거리가 6.5m(선형 굴착깊이의 2.0배) 이상인 경우(단계-1, 2, 3)에는 소단을 굴착하여도 흙막이 구조물의 거동에는 거의 변화가 없었다. 그 후 더욱 굴착을 진행하였을 때 소단이 점차 제거됨에 따라 흙막이벽의 응력·변형 및 스트럿의 축력이 서서히 증가하지만(단계-4, 5), 소단 경사면까지의 수평거리가 2.0m가 되는 단계-5의 굴착이 종료될 때까지는 흙막이 구조물에 미치는 굴착의 영향은 비교적 작았다. 흙막이벽의 응력·변형 및 스트럿 축력이 급증한 것은 단계-6의 굴착이 종료되었을 때, 즉 소단을 완전히 제거한 단계였다. 이와 같은 사실은 본 현장의 경우 흙막이벽으로부터 소단 경사면까지의 수평거리가 2.0m 정도여도 잔류



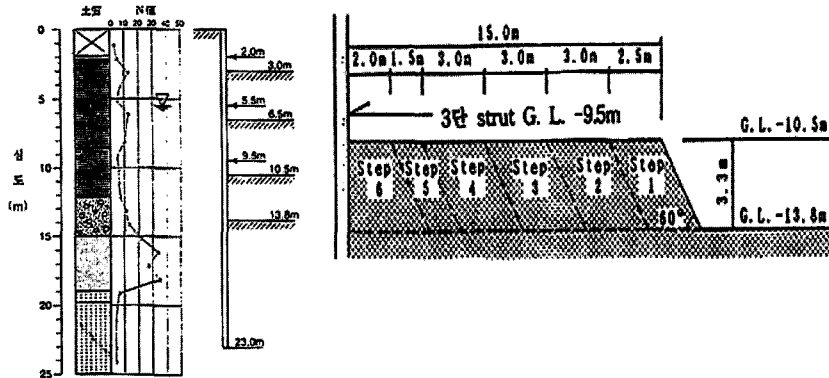


그림 15. 지반 조건, 흙막이의 개요 및 잔류 소단의 굴착 순서

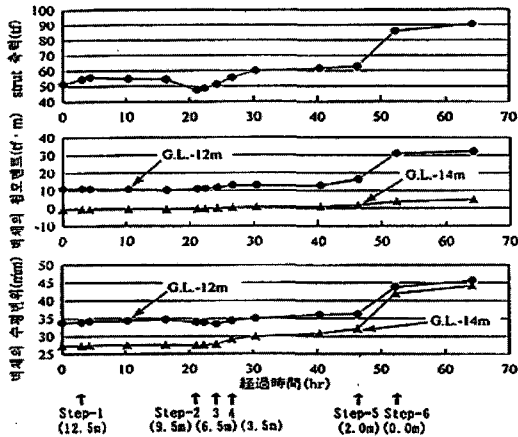


그림 16. 흙막이 구조물 변위 및 부재력의 경과시간별 변화

소단의 억제효과가 어느 정도 효과적으로 발휘된 것을 의미하고 있다.

즉 이와 같은 실제 소단에 대한 현장 측정 사례로부터, 본 연구에서의 모형 실험·수치해석 결과와 마찬가지로, 버팀 굴착시 흙막이 구조물 및 지반의 과도한 변형을 억제할 수 있는 효율적인 소단이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 흙막이벽에 바로 인접해 있는 흙은 저항체로서의 역할이 크므로 제거되었을 때 변위 및 스트럿 축력의 상당한 증가를 유발할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

스트럿을 이용한 도심지 근접 굴착시 과도한 굴착으로 인하여 지반 및 흙막이 구조물에 발생하는 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 소단에 대하여, 사례 분석, 모형실험, 수치해석 등을 통하여 사질토 지반을 중심으로 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 현장 사례, 모형 실험, 수치해석 등의 결과로부터 과도 변형 억제를 위한 저항체로서의 소단 적용은 상당히 효과적인 대책중의 하나로서 판단된다.
- 2) 자립식(무지보공) 및 버팀 굴착에 대한 모형 실험 결과, 흙막이 구조물 및 지반의 변형을 억제할 수 있는 효율적인 소단이 존재함을 확인하였다. 즉, 일정한 굴착 깊이에서 소단의 단위길이당 체적이 감소함에 따라 흙막이벽의 수평변위가 증가하는 경향을 보였으며, 소단의 체적이 어느 크기 이하로 줄어들어 따라 흙막이벽의 수평변위가 급속하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 소단의 형상으로는 삼각형 모양보다는 사다리꼴 모양이 굴착으로 인한 변위 억제에 훨씬 효과적이었다.
- 3) 수치해석 결과(내부마찰각 30°~35°인 풍화

토 지반 조건 및 국내의 일반적인 도심지 굴착의 경우를 대상), 소단의 크기가 점점 작아짐에 따라 벽체 최대 수평변위가 점차로 증가하는 경향을 보였으며, 지반 조건 및 굴착단계에 따라 약간씩 차이가 있으나 전반적으로 7~10 m³/m 정도의 소단 크기를 중심으로 벽체 최대수평변위의 증감이 뚜렷하게 달라지는 경향을 보였다. 또한, 소단의 수동저항을 이용하여 간접적으로 효율적인 소단 크기를 분석한 결과 평균적으로 9.3 m³/m 정도가 효율적인 값화토 지반 조건 및 국내의 일반적인 도심지 으로 나타났다.

따라서 상대밀도가 중간 정도 이상인 국내 사질토 지반에서의 도심지 버팀 굴착시, 일반적인 공사 상황 등을 고려했을 때, 과도한 변형을 억제하기 위한 효율적인 소단의 크기로서 약 10 m³/m 정도(예: 사다리꼴 형태, 소단 높이 2.5m, 소단 윗변 길이 2.5m 정도 크기의 소단)를 기준으로 삼을 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 삼성물산 건설부문 기술연구소 (1998). 도심지 버팀

굴착시 과도변형 억제를 위한 효율적 소단의 연구
 2. 양구승 (1996). 도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석., 서울대학교 대학원 박사학위논문, pp. 140~152.
 3. 양구승, 김명모 (1997). 도심지 깊은 굴착으로 발생하는 인접 지반 지표침하 분석., 한국지반공학회지, Vol. 13, No. 2, pp. 101~124
 4. 이종규 (1996). 근접 깊은 굴착에 따른 거동과 문제점., '96 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 25~36.
 5. 石井 雄輔, 宮崎 祐助, 森 正洋 (1994). 山留壁 周邊의 殘留法面의 押え效果., 第29回 土質工學研究發表會, pp. 1699~1700.
 6. Clough, G. W. and O'Rourke, T. D.(1990). Construction induced movements of insitu walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures. Geotechnical special publication No. 25, ASCE, pp. 455~456
 7. NAVFAC (1982). DM-7.2, pp. 101~113.
 8. O'Rourke, T. D. (1975). A study of two braced excavations in sands and interbedded stiff clay. Ph. D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
 9. Potts, D. M., Addenbrooke, T. I. and Day, R. A. (1993). The use of soil berms for temporary support of retaining walls. Proc. Int. Conf. Retaining Structures., Cambridge.

(접수일자 1998. 11. 6)