

버팀굴착시 버팀대 선행하중과 흠막이 구조물과의 상호 관계

Correlation between Strut Preloading and Earth Retaining Structures in Braced Excavations

오성남¹⁾, Sung-Nam Oh, 조현태²⁾, Hyun-Tae Cho, 박기태³⁾, Ki-Tae Park, 양구승⁴⁾, Ku-Seung Yang

¹⁾ (주)스마트엔지니어링 이사, Director, Smartec Engineering Co., Ltd.

²⁾ (주)스마트엔지니어링 기술팀장, Manager, Smartec Engineering Co., Ltd.

³⁾ 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 주임연구원, Associate Researcher, Institute of Technology, E&C Group, Samsung Co., Ltd.

⁴⁾ 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원, Principal Researcher, Institute of Technology, E&C Group, Samsung Co., Ltd.

SYNOPSIS : The use of strut preloading method is gradually increasing in braced excavations in Korea. And it is necessary to analyze the effects of strut preloading on the wall deflection, bending moment and strut axial force etc. In this study, by using the analysis method of beams on elasto-plastic foundations, parametric studies of correlation between preloading and earth retaining structures in sandy soils were performed in strut preloading application.

As results, about 50% of design strut load was effective as a preloading force in considering the displacement and member forces of structures. And at least the effective stiffness of strut should be over 25% of the ideal value in order to restrain the excessive increase of wall deflection and bending moments. In order to protect excessive movements in braced excavation, to preload the strut was rather effective way than to increase the stiffness of strut and braced wall, but the excessive axial force of strut should be checked simultaneously.

Key Words : braced excavation, preloading of struts, wall deflection, structural member forces

1. 서 론

버팀 굴착공에서 지반조건, 시공조건과 더불어 흠막이벽의 강성, 버팀대의 강성, 버팀대의 수평·수직 간격, 버팀대에 작용시키는 선행하중량 등은 흠막이 구조물의 설계시 고려되는 대표적인 항목들이다. 이들 가운데 버팀대 선행하중의 경우, 기존에 국내에서 주로 이용되어 오고 있던 스크류잭보다는 선행하중재를 활용한 현장 적용이 점차로 증가하고 있는 실정이다(1)(2).

이러한 버팀대 선행하중 공법 적용시, 선행하중이 흠막이벽의 변형과 흠막이벽의 휨모멘트, 버팀대의 축력 등 흠막이 구조물에 발생하는 부재력에 주는 영향에 대한 분석이 필수적이거나, 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 탄소성 지반상의 보 해석법을 이용하여, 국내 사질토 지반의 굴착 현장에서 측정된 결과와 해석치를 비교·분석하고, 균질한 사질토 지반 조건을 설정하여 버팀 굴착공에서의 효율적인 선행하중량에 대해 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 선행하중량과 흠막이벽의 변형 및 흠막이 구조물에 발생하는 부재력과의 상호 관계에 대해 분석하고자 하였다.

2. 실측 결과와의 비교

본 연구에서는 현장 측정 결과와의 비교를 위한 방법으로 흙막이 구조물 설계시 일반적으로 널리 활용되고 있는 탄소성 지반상의 보 해석법(이하 탄소성보법)을 이용하였다. 해석 프로그램으로서는 국내에서 많이 이용되고 있는 SUNEX를 사용하였다.

버팀대 선행하중 공법을 적용한 2개 현장 조건을 살펴보면 다음과 같다. A현장의 경우 지반 조건은 그림 1에 나타난 바와 같이 상부로부터 실트질 모래, 모래질 자갈, 풍화암 및 연암의 순으로 분포되어 있으며 지하수위는 평균 GL(-)10.5m에 위치하고 있다. 흙막이벽은 800mm 두께의 철근콘크리트 지중연속벽이며 최종 굴착 깊이는 22.05m이다. 한편 해석시 사용된 버팀대(2H-300×300×10×15, C.T.C 4.0m) 선행 하중의 분포는 18~40tf/2본(6.0~13.3tf/m)이다.

B현장의 경우 지반 조건은 그림 2에 나타난 바와 같이 상부로부터 매립토, 풍화 잔류토, 풍화암의 순으로 분포되어 있으며 지하수위는 평균 GL(-)10.0m에 위치하고 있다. 흙막이벽은 800mm 두께의 철근 콘크리트 지중연속벽이며 최종 굴착 깊이는 24.3m이다. 한편 해석시 사용된 버팀대(2H-300×300×10×15, C.T.C 3.7m) 선행 하중의 분포는 27.5~67.5tf/2본(7.4~18.2tf/m)이다.

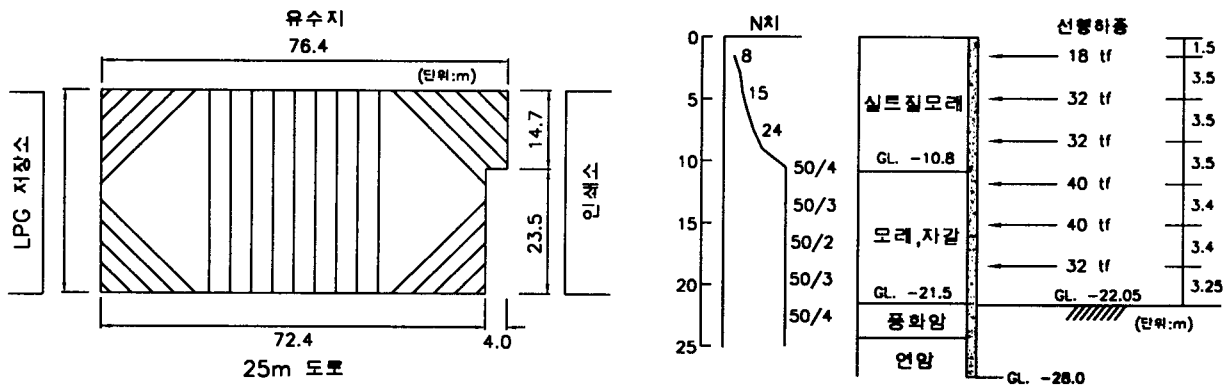


그림 1. A현장의 지반조건 및 버팀대 배치도

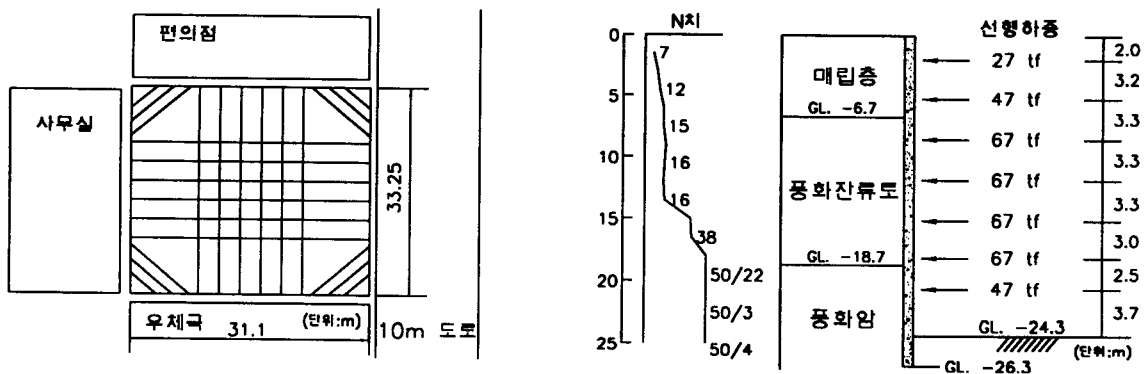


그림 2. B현장의 지반조건 및 버팀대 배치도

A, B 현장의 흙막이벽의 수평 변위에 대한 대표적인 굴착단계별 측정 결과와 해석 결과에 대한 비교가 그림 3 및 그림 4에 제시되어 있다. 그림 3, 그림 4로부터 알 수 있는 바와 같이 측정치와 해석치는 비교적 유사한 결과를 보이고 있다. 예를 들어 A 현장의 경우, GL(-)22.05m 굴착 단계에서 흙막이벽 최대수평변위의 측정값은 GL(-)18.5m 위치에서 33.51mm였으며, 해석치는 GL(-)20.0m 위치에서 24.82mm의 값을 보이고 있으며, B 현장의 경우 GL(-)20.0m 굴착 단계에서 흙막이벽 최대수평변위의 측정값은 GL(-)16.0m 위치에서 11.62mm였으며, 해석치는 GL(-)16.6m 위치에서 8.85mm로 상당히 유사한 결과를 보이고 있다.

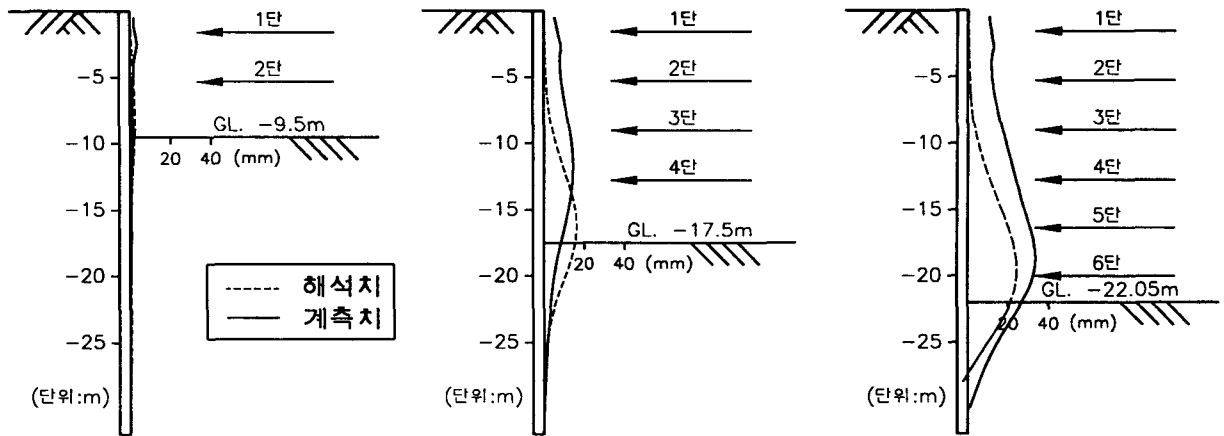


그림 3. 굴착단계별 흙막이벽의 수평변위 (A현장)

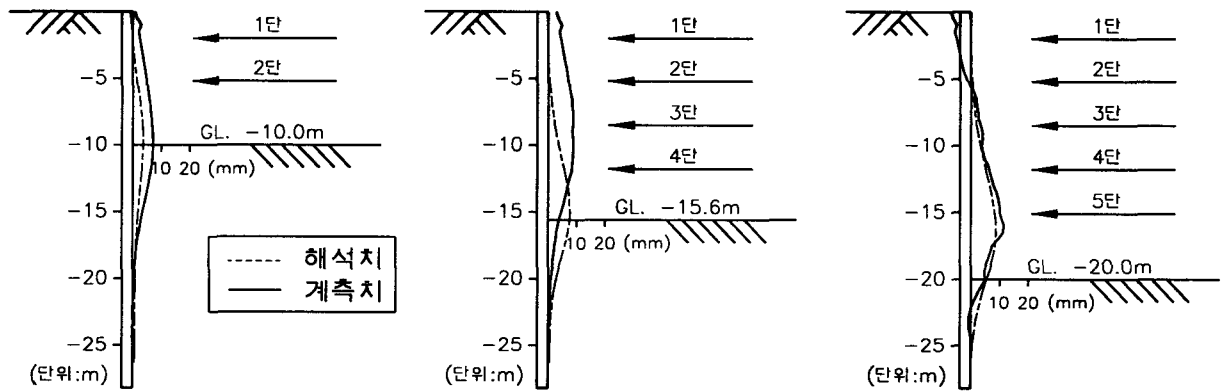


그림 4. 굴착단계별 흙막이벽의 수평변위 (B현장)

3. 선행하중과 흙막이 구조물과의 상호 관계

굴착 현장에서 버팀대에 선행하중을 도입할 때, 흔히 문제가 되는 것은 설계 축력의 몇 %에 해당하는 하중을 버팀대에 도입할 것인가 하는 점이다. O'Rourke(1981)에 따르면 버팀대에 가해지는 선행하중은 주로 흙막이 구조물에 존재하는 느슨한 부분을 제거하여 버팀대의 유효강성을 증가시키게 되며, 이러한 목적을 달성하기 위한 적절한 선행하중은 설계하중의 50% 정도로서, 이 정도의 선행하중은 버팀대에 과도한 축력을 발생시킬 가능성을 감소시킨다. 또한 일본의 경우 일반적으로 설계하중의 50%~70%의 선행하중을 도입하고 있는 것으로 알려져 있다(6). 한편 Canadian Geotechnical Society(1997)는 굴착에 따른 변위 억제를 위해 설계하중의 100% 정도까지의 하중을 선행하중량으로 언급하고 있다.

본 절에서는 선행하중량에 따른 흙막이 구조물 거동의 특징을 파악하기 위해서 다음과 같은 조건하에서 굴착단계별 해석을 실시하였다. 지반조건으로서는 내부마찰각이 40°, 전체단위중량은 1.7tf/m³인 사질토를 대상으로 설정하였다. 흙막이벽은 표 1에 제시되어 있는 바와 같이 다양한 휨강성에 대한 영향을 분석하기 위해 4종류로 구분하였으며, 굴착폭은 40m, 흙막이벽의 근입 길이는 최종 굴착면으로부터 6.0m, 최종 굴착 깊이는 GL(-)22.0m이다. 버팀대(2H-300×300×10×15)의 강성은 6289.5tf/m, 버팀대의 수평·수직 간격은 각각 4.0m와 3.0m로 설정하였다. 한편 선행하중의 크기는 선행하중을 작용시키지 않고 해석한 결과로부터 얻어지는 각 버팀대에 작용하는 최대 축력(이하 설계하중)을 기준으로 하여, 이 값의 0%, 25%, 75%, 100%에 각각 해당하는 값으로 구분하였다.

표 1. 해석 대상 흙막이의 종류 및 벽체의 휨강성

벽체종류	벽체제원	휨강성 (tf · m ² /m)
H-PILE	H-300×305×15×15, C.T.C=1.0m	4,515
C I P	φ=0.4m, C.T.C=0.4m, $\sigma_{ck} = 180\text{kgf/cm}^2$ H-298×201×9×14, C.T.C=2.0m	8,001
D-Wall 1	t = 0.8m, $E_c = 2.1 \times 10^6 \text{tf/m}^2$	89,600
D-Wall 2	t = 0.5m, $E_c = 2.1 \times 10^6 \text{tf/m}^2$	21,875

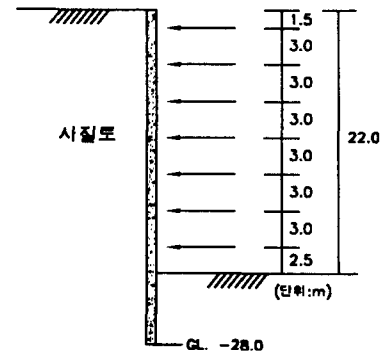
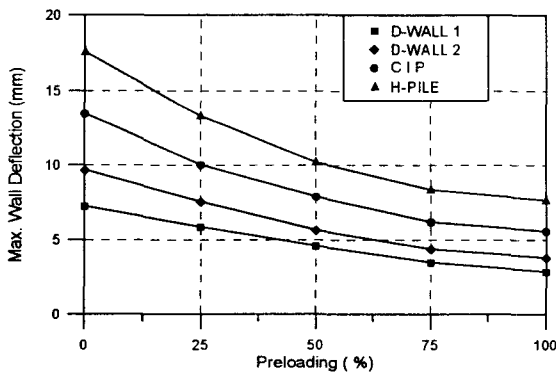


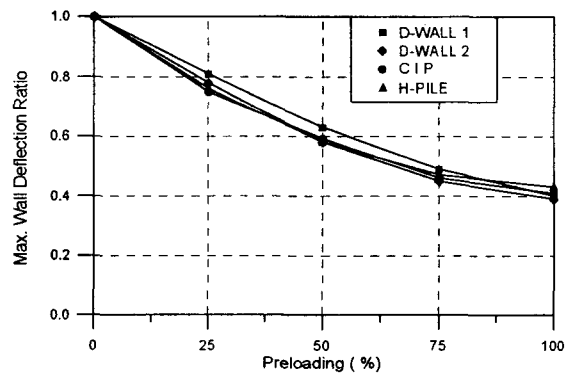
그림 5. 버팀대 배치도

3.1 선행하중량에 따른 흙막이 구조물의 거동

그림 6은 선행하중량에 따른 벽체의 최대 수평변위의 변화를 나타낸 것으로서, 벽체의 휨강성과 선행하중이 클수록 벽체 최대 수평변위가 작아지는 일반적인 경향을 보이고 있다. 그림 6-(b)는 그림 6-(a)의 각 경우에서 선행하중별 벽체 최대 수평변위를 선행하중이 없을 때 발생한 벽체의 최대 수평변위로 정규화한 결과이다. 그림 6-(b)로부터 알 수 있는 바와 같이 선행하중의 크기에 따른 벽체 수평변위의 변화는 벽체의 강성에 거의 무관하게 일정한 경향을 보이고 있다. 즉 25%, 50%, 75%, 100%에 해당하는 각 선행하중 단계에서 벽체 최대수평변위는 선행하중이 없을 때 발생한 값의 22.5%, 40.5%, 53.2%, 59.3% 정도씩 각각 감소하였다. 또한 그림 6에 나타난 결과를 참조했을 때 변위 억제를 위한 효율적인 선행하중은 설계하중의 약 50%~75% 정도의 범위에 해당한다고 판단된다.



(a)



(b)

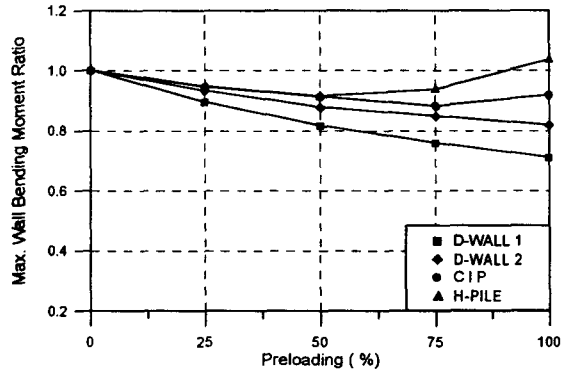
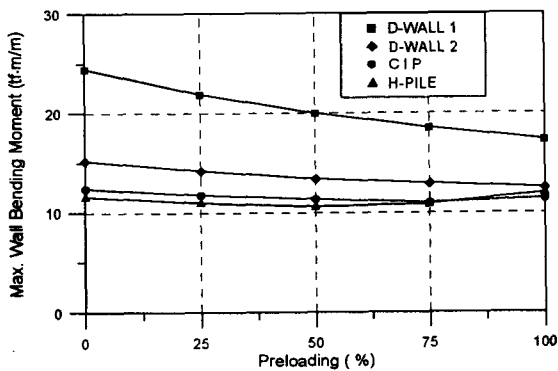
그림 6. 선행하중의 크기에 따른 벽체 최대 수평변위의 변화

그림 7과 그림 8은 선행하중량에 따라 흙막이 구조물에 발생하는 부재력의 변화를 나타낸 것이다. 그리고 그림 7과 그림 8의 그림 (b)는 그림 6-(b)에서와 마찬가지로 선행하중이 없을 때의 값을 기준으로 정규화한 것이다. 그림 7은 벽체의 최대 휨모멘트의 변화를 나타낸 것으로서 벽체의 휨강성이 상대적으로 큰 경우(D-WALL 1, 2)에는 선행하중이 증가할수록 벽체에 발생하는 최대 휨모멘트는 감소하고, 벽체의 휨강성이 상대적으로 작은 경우(H-Pile, CIP)에는 설계하중의 50%~75% 정도의 선행하중까지 감소하다가 증가하는 경향을 나타냈다.

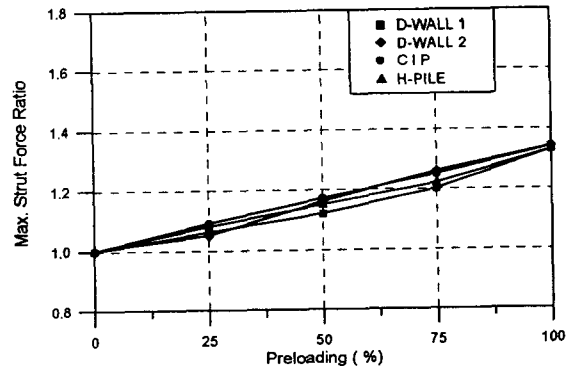
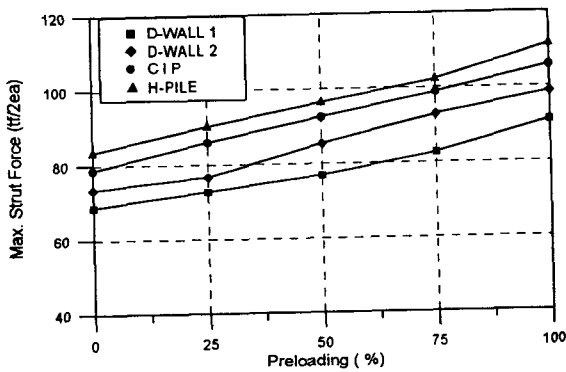
그림 8은 버팀대 최대 축력의 변화를 나타낸 것으로서 벽체의 휨강성이 작을수록 버팀대에 작용하는 최대 축력이 큰 일반적인 경향을 보이고 있다. 그림 8-(b)로부터 알 수 있는 바와 같이 선행하중의 크기

에 따른 버팀대 축력의 변화는 벽체의 강성에 거의 무관하게 일정한 경향을 보이고 있다. 즉 25%, 50%, 75%, 100%에 해당하는 각 선행하중 단계에서 버팀대 최대 축력은 선행하중이 없을 때 발생한 값의 7%, 15%, 23%, 33% 정도씩 각각 증가하였다.

그림 6~그림 8에 제시된 벽체의 변위, 벽체의 휨모멘트, 버팀대의 축력에 대한 결과를 종합했을 때, 사질토 지반에서 버팀굴착을 수행할 경우 버팀대에 작용하는 설계하중의 약 50% 정도에 해당하는 값이 효율적인 선행하중의 크기라고 판단된다.



(a) (b)
그림 7. 선행하중의 크기에 따른 벽체 최대 휨모멘트의 변화



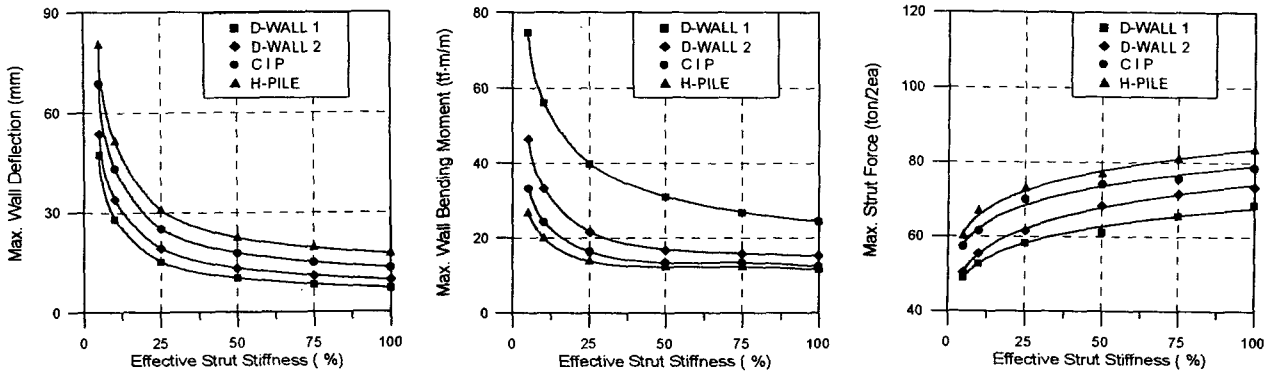
(a) (b)
그림 8. 선행하중의 크기에 따른 버팀대 최대 축력의 변화

3.2 버팀대의 유효강성에 따른 흙막이 구조물의 거동

버팀대를 지보재로 이용하는 경우, 버팀대의 강성은 흙막이벽과 부재의 설치상황, 부재 상호간의 밀착 정도 등의 조건에 따라 결정된다(3). Palmer와 Kenney(1972)에 따르면 Oslo 지하철 현장에서 버팀대에 선행하중을 재하하지 않은 상태에서 실측한 버팀대의 초기강성은 이상강성의 2~4% 정도였다. 또한 O'Rourke(1981)는 Washington Metro 현장에서 버팀대에 설계하중의 50%의 선행하중을 재하한 상태에서 실측한 버팀대의 강성은 이상강성의 45%~75% 정도였다고 보고하였다.

따라서 국내의 시공 상황 등을 고려했을 때 흙막이 구조에 대한 해석 및 설계시 시공 조건 등을 고려하여 버팀대의 강성을 어느 정도 감소시켜 주는 것이 보다 합리적이라고 판단된다.

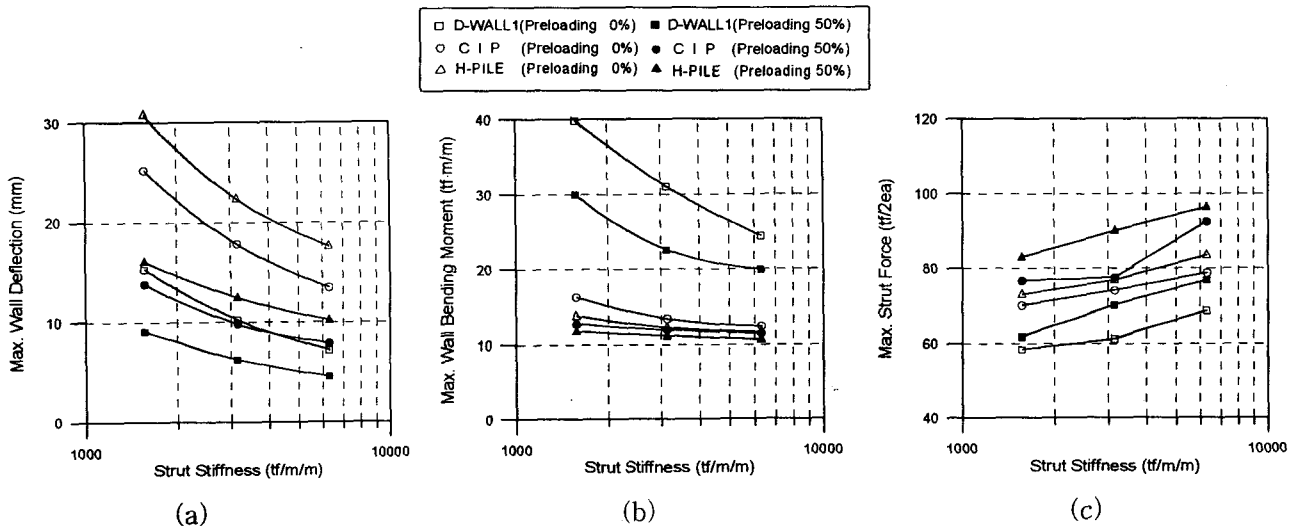
그림 9는 벽체의 종류별로 버팀대의 유효강성에 따른 벽체의 최대 수평변위 및 부재력의 변화를 나타낸 것으로 버팀대의 강성이 줄어들에 따라 벽체의 최대 수평변위량과 최대 휨모멘트는 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 반면 버팀대의 최대 축력은 감소하는 경향을 보인다. 예를 들면 버팀대의 유효강성이 100%인 경우에 비해 강성이 5%로 감소되었을 때 평균적으로 벽체의 최대 수평변위는 5배, 벽체 최대 휨모멘트는 3배 정도 증가하였으며, 버팀대 최대 축력은 0.7배 정도 감소하였다. 또한 벽체의 종류와 관계없이 버팀대의 강성이 이상강성의 25% 이하가 되면 벽체의 최대 수평변위 및 부재력이 급속하게 변화하므로 최소한 이상강성의 25%이상 버팀대의 유효강성을 확보하여야 한다고 판단된다.



(a) (b) (c)
 그림 9. 버팀대의 유효강성에 따른 벽체의 최대 수평변위 및 부재력의 변화

3.3 버팀대의 강성과 선행하중에 따른 흙막이 구조물의 거동

그림 10은 버팀대 강성의 변화에 따른 흙막이벽의 수평변위, 휨모멘트, 버팀대의 축력 변화를 선행하중이 없는 경우와 50%의 선행하중을 가한 경우에 대해 각각 분석한 것이다.



(a) (b) (c)
 그림 10. 버팀대의 강성과 선행하중에 따른 벽체의 최대휨변형량 및 부재력의 변화

그림 10-(a)는 버팀대 강성의 크기에 따른 벽체 변위 억제효과와 선행하중량에 의한 벽체 변위 억제효과를 비교한 것으로 벽체 변위 억제측면에서 보면 버팀대의 강성을 키우는 것보다 설계하중의 50%에 해당하는 선행하중을 작용시키는 것이 훨씬 효과적임을 나타내고 있다.

또한 버팀대의 강성이 증가할수록 벽체에 작용하는 최대 휨모멘트는 감소하며, 동일한 강성의 버팀대에서 50%의 선행하중을 작용시킨 경우가 선행하중이 없는 경우보다 항상 작은 최대 휨모멘트를 나타내었다(그림 10-(b) 참조). 반면 버팀대에 작용하는 최대 축력은 벽체에 작용하는 최대 휨모멘트와는 상반된 경향을 보인다는 것을 그림 10-(c)에서 확인할 수 있다.

위와 같은 해석 결과를 종합하면 굴착으로 인한 변위를 억제하는 데에 있어서 버팀대의 강성을 키우는 것보다 버팀대에 선행하중을 도입하는 것이 효과적이거나 버팀대에 과도한 축력 증가가 유발될 수 있으므로, 설계시 이러한 점을 고려하여 굴착단계에 따라 버팀대 선행하중과 버팀대 강성을 적절하게 조합하여 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.4 흙막이벽의 휨강성과 선행하중량에 따른 흙막이 구조물의 거동

그림 11은 벽체 휨강성의 크기에 따른 흙막이 벽체의 수평변위, 휨모멘트, 버팀대 축력의 변화를 버팀대 선행하중을 기준으로 하여 비교한 것이다.

버팀대 설계하중의 50%에 해당하는 선행하중을 적용한 경우 벽체의 휨강성을 증가시킨 것과 마찬가지로의 효과가 있음을 알 수 있다(그림 11-(a) 참조). 예를 들면 휨강성이 $4,515(\text{tf} \cdot \text{m}^2/\text{m})$ 인 벽체에 선행하중(50%)을 작용시키면 17.56mm인 벽체의 최대 수평변위가 10.16mm로 감소하게 되는데, 이는 $18,000(\text{tf} \cdot \text{m}^2/\text{m})$ 정도의 휨강성을 갖는 벽체에서의 최대 수평변위에 해당하는 값이다. 이때 벽체에 작용하는 최대 휨모멘트는 벽체의 휨강성이 증가할수록 증가하고 선행하중(50%)을 작용시키면 선행하중이 없는 경우(0%)에 발생하는 최대 휨모멘트보다 항상 작은 경향을 보이고 있다(그림 11-(b) 참조). 반면 버팀대에 작용하는 축력은 벽체의 휨강성이 증가할수록 감소하지만, 선행하중(50%)을 작용시키는 경우 선행하중이 없는 경우(0%)에 비해 버팀대 축력이 항상 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 11-(c) 참조).

위와 같은 해석 결과를 종합하면 굴착으로 인한 변위를 억제하는 방법중의 하나로서 벽체의 휨강성을 증가시키는 경우에 있어서, 벽체의 휨강성을 키우는 것보다 버팀대에 선행하중을 도입하는 것이 효과적이거나 버팀대에 과도한 축력 증가가 유발될 수 있으므로, 설계시 이러한 점을 고려하여 버팀대 선행하중과 벽체의 휨강성을 적절하게 조합하여 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

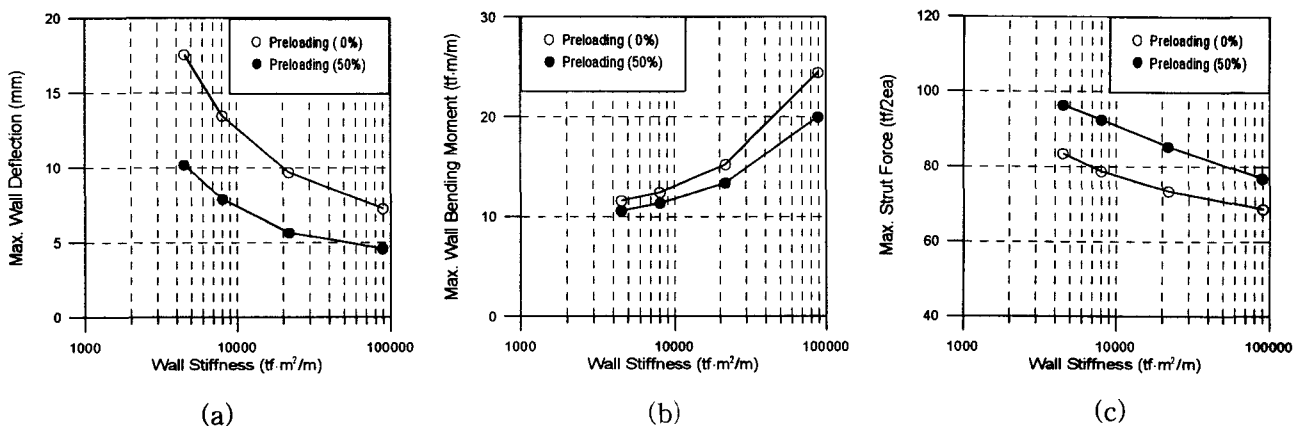


그림 11. 흙막이벽의 휨강성과 선행하중의 크기에 따른 벽체의 최대 수평변위 및 부재력의 변화

4. 결론

사질토 지반에서의 굴착 공사시 버팀대 선행하중과 흙막이 구조물과의 상호 관계에 대해 탄소성 지반상의 보 해석을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변위 억제와 부재력의 증감 등을 함께 고려했을 때, 버팀대에 작용하는 설계하중의 약 50%에 정도에

해당하는 값이 효율적인 버팀대 선행하중의 크기라고 판단된다.

2. 현장에서 시공되는 버팀대의 유효강성은 최소한 이상강성의 25% 정도 이상이 확보되어야 벽체의 변위 및 휨모멘트의 급속한 증가를 억제할 수 있다고 사료된다.
3. 굴착으로 인하여 발생하는 변위를 억제하기 하기 위해 버팀대의 강성, 흙막이 벽체의 휨강성을 증가시키는 것보다 버팀대에 선행하중을 도입하는 것이 보다 효과적이나, 버팀대에 과도한 축력 증가가 유발될 수 있으므로, 흙막이 구조에 대한 해석 및 설계시 버팀대 선행하중량과 버팀대 강성, 벽체의 휨강성과를 적절하게 조합하여 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 백규호, 오성남, 조현태, 양구승 (1998), "버팀대 선행하중 공법을 이용한 깊은 굴착 사례 연구", 한국지반공학 가을학술발표회 논문집, pp. 225-232.
2. 스마텍엔지니어링 (1998), 흙막이벽체를 지지하기 위한 선행하중장치 및 그 시공방법, 건교부 신기술 지정 신청서, pp. 15-32.
3. 양구승 (1996), 도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 관한 분석, 공학박사 학위논문, 서울대학교, pp. 148-150.
4. 천일지오컨설팅 (1997), 단계별 지하굴착에 대한 탄소성해석 프로그램 사용법 설명서, 6th Edition.
5. 野尻明美, 近藤貞雄 (1973), "近切り工事における切バリプレロード工法", 土と基礎, No. 771, pp. 27-34.
6. 土質工學會 (1981), 根切り・山留め・仮締切り入門, pp. 187-193.
7. 土質工學會 (1987), 地盤工學における數値解析の實務 (現場技術者のための土と基礎シリーズ 13), pp. 195-209.
8. Canadian Geotechnical Society(1997), "Foundation Engineering Manual", 3rd ed., p.416
9. O'Rourke, T. D. (1981), "Ground movements caused by braced excavation", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT9, pp. 1159-1178.
10. Palmer, J. H. L. and Kenny, T. C. (1972), "Analytical Study of a Braced Excavation in Weak Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, pp. 145-164.