

강관버팀보 적용 흙막이 시스템 거동 특성

Behavior of deep excavation system supported by steel pipe struts

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 나승민²⁾, Seung-Min Na, 이종구²⁾, Jong-Goo Lee, 강동욱³⁾, Dong-Wook Kang

¹⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 포항산업과학원 강구조연구소 책임연구원, Senior Researcher, RIST

²⁾ 포항산업과학원 강구조연구소 책임연구원, Senior Researcher, RIST

³⁾ 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : This paper presents the results of a numerical investigation on behavior of deep excavation wall system supported by steel pipe struts. A series of three-dimensional finite element analyses were carried out on a deep excavation project site which adopted steel pipe struts. The results indicated that the mechanical behavior of steel pipe supported deep excavation is comparable to that of a conventional H-pile supported deep excavation, although the steel pipe supported system is required less number of struts than the conventional H-pile strut system. Also shown is that the sectional stresses of the steel pipe support system are within the allowable values implying that the steel pipe support system can be effectively used as an alternative to conventional H-pile support system.

Keywords : deep excavation, steel pipe strut, finite element analysis

1. 서론

산업화의 가속 및 경제 성장에 따라 근래 들어서는 고층빌딩 및 아파트뿐만 아니라 교량 등의 건축 및 토목 구조물이 대형화 추세에 따라 건설현장의 굴착공사 또한 대형화 되고 있는 추세이다. 따라서 보다 안전하고 경제적인 흙막이 지보 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 현재 적용되고 있는 버팀보 흙막이 지보시스템의 대표적인 형식은 H-형강 버팀보를 주 지지구조로 활용하는 공법이라고 할 수 있다. H-형강 버팀보 지보 시스템은 버팀보 이외에도 수평 및 수직 브레이싱 등을 시공하여야 하므로 현장 조건에 따라 작업공간 확보에 많은 어려움이 있을 수 있다. 최근 들어 H-형강 버팀보 대체 공법으로서 강관을 버팀보로 활용하는 공법이 국내에서 도입되어 적용되고 있다(그림 1). 강관 버팀보 공법은 강관의 고강도(High Strength) 및 고강성도(High Stiffness)의 역학적 특성을 활용하므로 설치 간격이 줄어들고 특히 수직 브레이싱을 생략할 수 있어 작업공간 확보가 매우 용이하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 강관 버팀보 적용 흙막이 시스템의 실무적용 활성화에 필요한 각종 메카니즘 이론정립을 위해 고강도 강관 버팀보가 적용된 기 시공된 시공조건에 대해 3차원 유한요소해석을 수행하여 고강도 강관 버팀보 공법의 효율성 및 역학적 거동 특성을 고찰하였다.

◆ 인천 청라 심곡2교 건설공사



그림 1. 강관 버팀보 적용 굴착현장 예시 1 [(주)엠스틸인터내셔널 홈페이지]

2. 검토 대상 현장

2.1 개요

본 연구에서는 인천 청라지구 지하차도 건설 현장에 적용된 설계/시공조건을 고려하였다. 당 현장은 강관 버팀보 적용 현장으로서 현재 시공이 완료된 상태이다. 그림 2는 강관 버팀보 적용 단면을 나타내고 있다.

당 현장의 굴착깊이와 폭은 각각 13m와 30m로서 총 5단계 굴착이 이루어지는 것으로 설계 되었다. 한편, 굴착대상 지반은 표 1에서와 같이 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암으로 이루어져 있다. 대부분의 지반굴착은 토사지반에서 이루어지며 측면 벽체로 활용되는 Sheet pile은 N=30 정도의 풍화토 지반에 근입 되는 것으로 설계되었다. 표 2는 각각 지반의 역학적 특성치를 정리하고 있다.

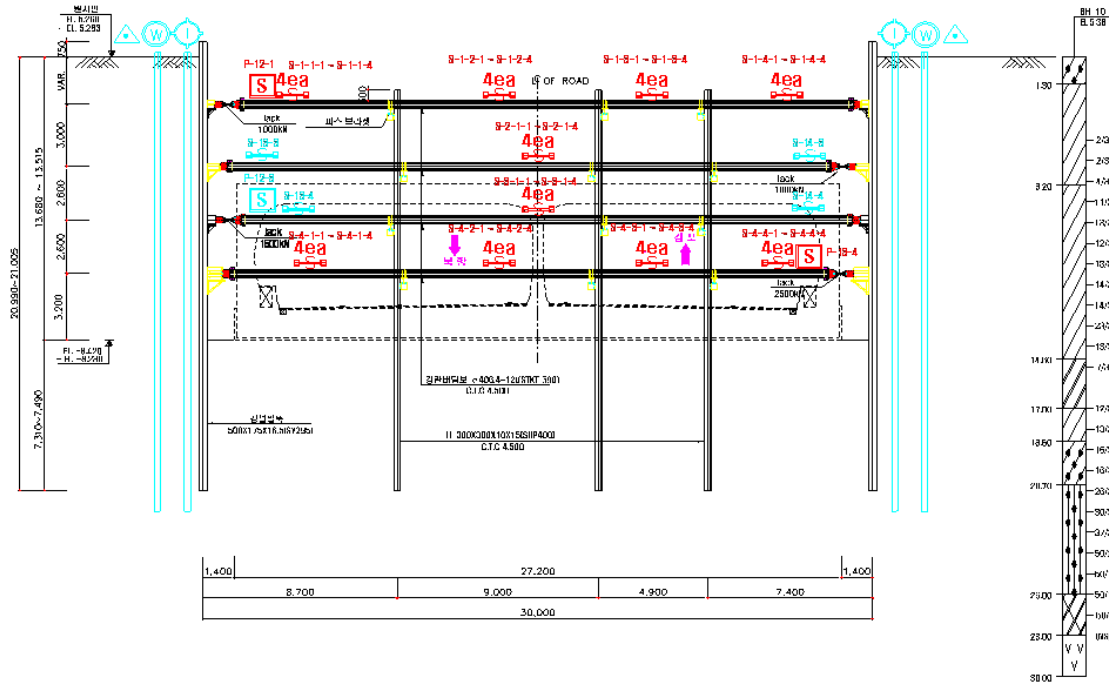


그림 2. 강관 버팀보 적용 조건 단면

표 1. 지층별 역학적 특성

구 분	내부 마찰각 $\phi (^{\circ})$	점착력 (kPa)	습윤단위중량 $\gamma_t (kN/m^3)$	수중단위중량 $\gamma' (kN/m^3)$	두께 (m)
매립층(SM)	25.0	5.0	17.5	7.5	5.0
퇴적층(SM)	30.0	10.0	19.0	9.0	8.0
풍화토(SM)	30.0	10.0	19.0	9.0	7.0
풍화암(WR)	35.0	50.0	20.0	10.0	-

2.3 강관 버팀보 흙막이 시스템

당현장에서는 직경 400mm 벽두께 7mm 의 강관 강관 (STKT 590 - $\Phi 406.4mm$ $t = 7mm$)을 버팀보로 적용하였으며 H-형강 버팀보 적용 조건에 사용하는 SM 490 H - $350 \times 350 \times 12 \times 19$ 의 사양을 갖는 버팀보를 적용하였다. 기타 Sheet pile 벽체, 중간과일에 대한 부재별 사양은 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 흙막이 지보 시스템 사용강재

종류	강관 버팀보 지보 시스템
벽체	SPV - $500 \times 175 \times 16.5$ (Sheet pile)
버팀보	STKT 590 - $\Phi 406.4mm$ $t = 7mm$ (C.T.C. 4.5M)
중간말뚝	SHP 400 H - $300 \times 300 \times 10 \times 15$ (C.T.C. 4.5M)
수평브레이싱	\sqsubset - channel - $150 \times 75 \times 65 \times 10$ (SS400)
수직브레이싱	NA
띠장	SM 490 H - $400 \times 408 \times 21 \times 21$

주요 부재별 제원 및 구조적 특성은 아래와 같다.

(1) 측면 벽체 (Sheet pile: *SPV* - $500 \times 175 \times 16.5$)

$A = 21,920 \text{ mm}^2/m$	$A_w = 11,550 \text{ mm}^2/m$
$w = 1,720 \text{ kN/m}$	$r_x = 129.04 \text{ mm/m}$
$I_x = 402,900,000.0 \text{ mm}^4/m$	$Z_x = 2,310,000.0 \text{ mm}^3/m$

(2) 띠장 (H-형강: *SM 490 H* - $400 \times 408 \times 21 \times 21$)

$A = 25,070 \text{ mm}^2$	$r_x = 168.00 \text{ mm}$
$w = 1,970 \text{ kN/m}$	$r_y = 97.50 \text{ mm}$
$I_x = 709,000,000.0 \text{ mm}^4$	$Z_x = 3,540,000.0 \text{ mm}^3$
$I_y = 238,000,000.0 \text{ mm}^4$	$Z_y = 1,170,000.0 \text{ mm}^3$

(3) 강관 버팀보 (강관: *STKT 590* - $\Phi 406.4 \text{ mm } t = 7 \text{ mm}$)

$A = 14,868.5 \text{ mm}^2$	$Z = 1,424,000.0 \text{ mm}^3$
$I = 289,370,000.0 \text{ mm}^4$	$R = 139.5 \text{ mm}$

3. 3차원 유한요소해석

3.1 해석모델링

본 연구는 강관 버팀보 흠막이 지보 시스템에 있어 지반 및 구조 부재 거동 특성을 세부적으로 고찰 하는데 주안점을 두었으므로 지보 시스템 형식별 상세 모델링이 가능한 구조/지반 해석 범용 프로그램 적용이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 구조분야 및 지반분야에 있어 효율성이 검증된 범용 유한요소 해석 프로그램 Abaqus 6.7(Abaqus 2007)을 사용하였다. Abaqus는 구조부재의 모델링이 가능한 다양한 종류의 요소 형태를 제공하고 지반의 비선형 탄소성 거동을 효율적으로 모사할 수 있는 알고리즘을 제공함과 아울러 굴착문제의 모델링에 필수적인 요소의 제거 및 추가 기능을 제공한다.

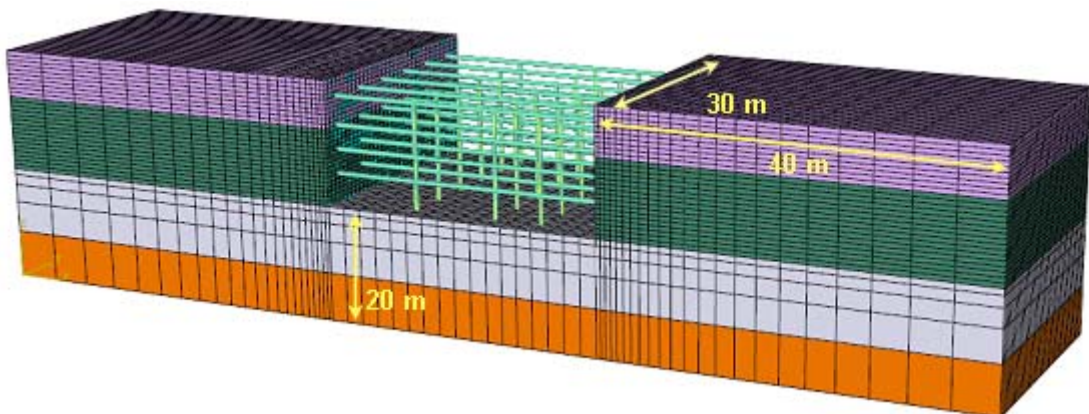


그림 3. 차원 해석 구간 모델링 개요도

본 연구에서 수행한 3차원 유한요소해석 모델링에서는 2장에서 기술한 검토 대상구간의 굴착깊이 및 폭, 지반조건, 버팀보 설치조건, 단계굴착 과정 등을 종합적으로 고려하여 아래 그림 3과 같은 해석 모델을 채택하였다. 먼저 해석 모델의 제원 설정에 있어 필요한 수직경계면 및 바닥경계면은 각각 벽체로부터 40m, 최종 굴착면 바닥으로부터 20m 하부에 설치하여 해석에 필요한 모델을 설정하였다. 아울러 벽체와 평행한 방향인 종방향으로는 30m 구간을 해석 모델에 포함시켰다. 경계조건 설정에 있어 수직경계면에는 경계면의 수직방향의 변위를 구속하는 롤러를 설치하였으며(즉, $\delta_x = 0$ 혹은 $\delta_y = 0$) 바닥경계면에는 모든 방향의 변위를 구속하는 힌지를 설치하였다($\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0$).

해석 모델의 이산화에 있어 Sheet pile 벽체는 굴착과정에서 발생하는 휨저항 특성을 현실적으로 모델링할 수 있는 3차원 셸요소(S4R)를 이용하여 모델링하였다. 이때 Sheet pile의 제원을 토대로 산정된 휨강성을 갖는 등가의 구조부재 특성을 갖도록 모델링하였다. 한편, 강관 버팀보 및 중간말뚝은 축방향 저항 및 휨저항을 고려할 수 있는 3차원 빔요소(B32)를 이용하여 모델링하였다. 그림 4에서는 강관 버팀보 및 중간과일에 대한 모델을 보여주고 있다.

한편, 유한요소해석 모델링에서는 표 3과 같은 단계별 굴착 및 버팀보 설치과정을 시공과정에 부합되도록 상세히 모델링 하였다. 이러한 일련의 굴착과정은 Abaqus에서 제공하는 "Remove Element" 및 "Add Element" 기능을 활용하여 요소의 제거 및 추가 방법으로 모델링하였다.

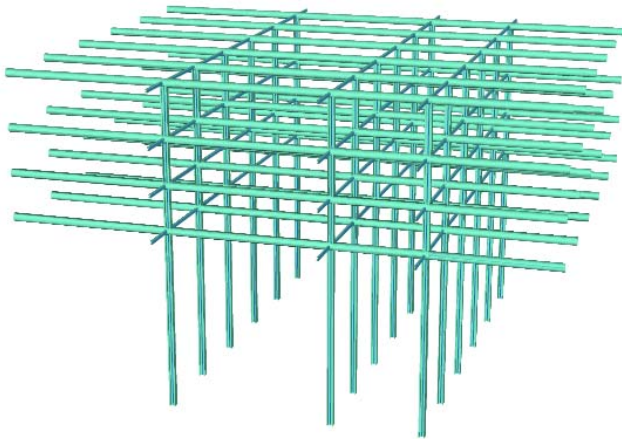


그림 4. 버팀보 모델링 상세

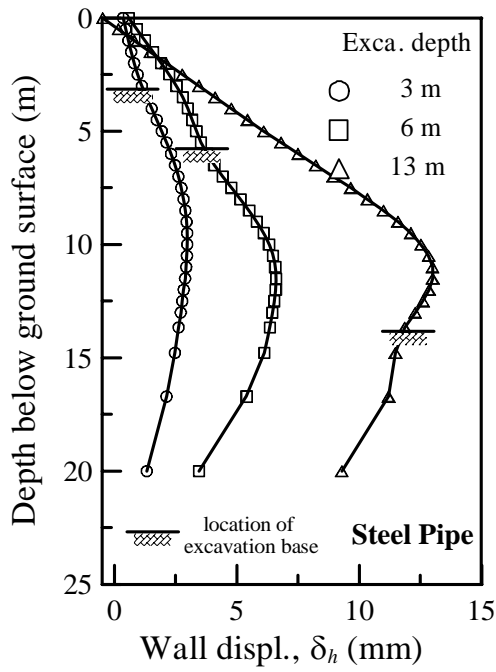
표 3. 굴착 및 버팀보 설치 단계

단계	작업 내용
1	3.0m 까지 굴착
2	2.0m 지점에 1단 버팀보 설치
3	6.0m 지점까지 굴착
4	5.0m 지점에 2단 버팀보 설치
5	8.5m 지점까지 굴착
6	7.5m 지점에 3단 버팀보 설치
7	11m 지점까지 굴착
8	10m 지점에 4단 버팀보 설치
9	13m 지점까지 굴착

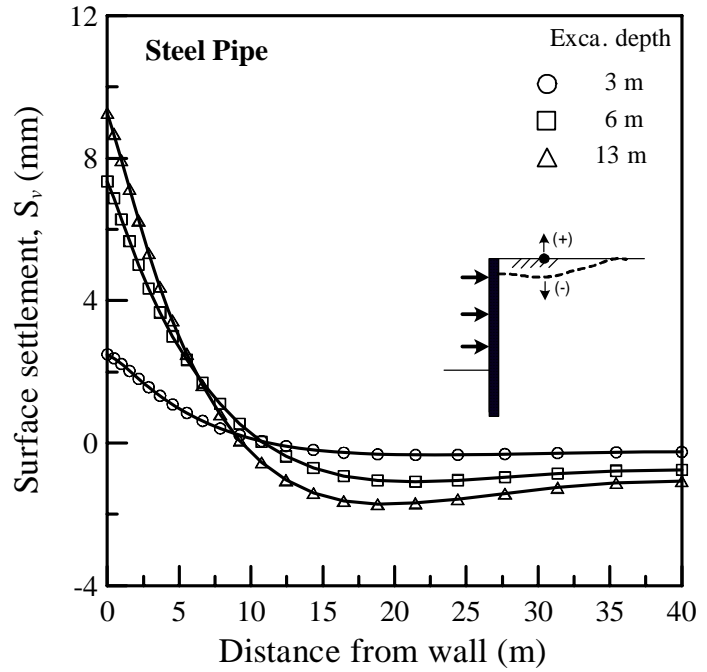
4. 결과 분석 및 고찰

4.1 벽체 변위 및 배면 침하

그림 5는 굴착 단계별 벽체 수평 변위(δ_h) 및 배면 침하 발생 경향을 나타내고 있다. 먼저 벽체 수평 변위에 대한 결과를 나타내고 있는 그림 5(a)를 관찰해 보면 굴착깊이가 증가하면서 벽체 변위가 증가하는 지하굴착 과정에서 관찰할 수 있는 전형적인 경향을 보이고 있으며 최종 굴착단계에서의 최대 벽체 수평변위는 13mm, 즉 굴착깊이(H)의 약 0.1% 정도가 발생하는 것을 나타냈는데 이는 기존의 연구(Yoo 2001)에서 보고된 유사한 시공조건에서 발생하는 수평변위와 거의 동일한 것으로 나타났다. 한편, 굴착 단계별 굴착배면 침하(S_v)를 나타내고 있는 그림 5(b)를 관찰하면 강관 버팀보의 높은 강성으로 인해 벽체 인접부에서는 하양 침하보다는 상향 허빙이 최대 9mm 정도 발생하는 것으로 검토되었다.

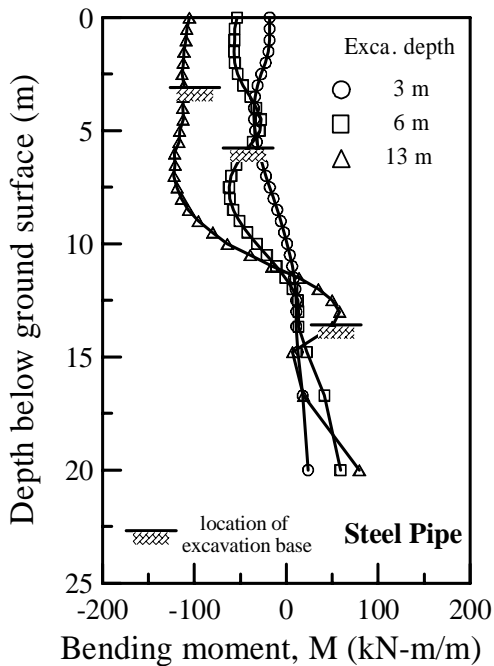


(a) 벽체 수평변위

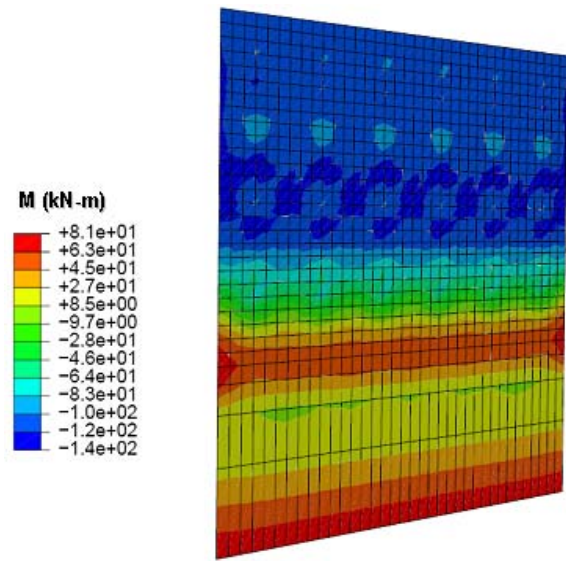


(b) 배면 침하

그림 5. 흙막이 벽체 수평변위 및 배면 침하



(a) 굴착단계별 결과



(c) Hex = 13m

(b) 최종단계 칸투어

그림 6. 굴착단계별 벽체 휨모멘트

4.2 벽체 휨모멘트 및 버팀보 축력

그림 6은 굴착 단계별 벽체 휨모멘트(M_{wall}) 발생 경향을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 전반적으로 굴착깊이가 증가함에 따라 휨모멘트가 증가하는 전형적인 경향이 나타나는 것으로 검토되었다. 정

량적으로 살펴보면 각 굴착단계별 최대 모멘트($M_{w,max}$)는 약 130 kN-m 정도가 발생하는 것으로 나타났으며 이를 휨응력(f_b)으로 환산하면 약 $f_b = 56.3 MPa$ 정도로서 이러한 수치는 허용 휨응력 $f_{ba} = 243 MPa$ 을 고려할 때 약 $FS = 4.3$ 의 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이러한 결과 역시 강관 버팀보 적용 지지구조가 기존 H-형강 버팀보에 비해 수평간격을 넓게 적용함에도 불구하고 H-형강 버팀보 적용 지지구조와 거의 유사한 성능을 발휘함을 나타내는 것으로서 당 현장에서와 같이 강관 버팀보 적용시 넓은 수평간격을 유지하여도 H-형강 버팀보와 거의 유사한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 7에서는 굴착 단계별 버팀보 축력 발생 경향을 정성·정량적으로 보여주고 있다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 강관 버팀보의 최대 축력이 약 650kN 정도로 발생하는 것으로 나타났는데 별도로 수행된 H-형강 버팀보 적용 조건에 대한 해석 결과와 비교하면 약 8% 큰 축력이 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나 강관 버팀보의 허용 압축응력이 H-형강 버팀보에 비해 현저히 크므로 축력을 압축응력으로 환산하여 허용압축응력과 비교할 경우 허용치를 훨씬 밑도는 것으로 나타나 구조적 문제는 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

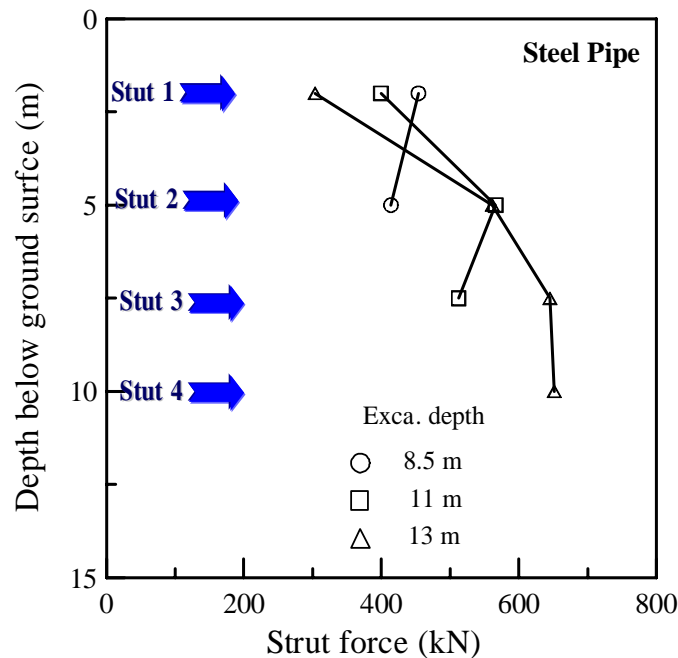


그림 7. 굴착단계별 버팀보 축력

5. 결론

본 연구에서는 강관 버팀보 적용 흙막이 시스템의 실무적용 활성화에 필요한 각종 메카니즘 이론정립을 위해 기 시공된 시공조건에 대해 고강도 강관 버팀보 적용조건에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 고강도 강관 버팀보 공법의 효율성 및 역학적 거동 특성을 고찰하였다. 해석 결과 강관 버팀보 지지구조의 하중 지지 메카니즘은 기존의 H-형강 버팀보 지지구조와 거의 유사한 것으로 나타났으며 벽체 변위 및 주변 지반 거동의 측면에서는 지지구조 형식별로 큰 차이를 보이지 않았으며 벽체 및 버팀보 등 지지구조의 단면력 또한 허용치 이내를 유지할 수 있는 것으로 검토되었다. 이러한 경향은 강관 버팀보 지지구조에 있어 버팀보가 H-형강 버팀보 지지구조 형식에 비해 1.5배 정도의 수평간격으로 설치된 점을 감안 할 때 이러한 결과는 강관 버팀보 지지구조의 구조적 효율성을 나타낸다고 할 수 있으며 고강도 및 고강성의 구조적 특성을 활용함에 따라 버팀보 설치간격을 증가시켜 넓은 작업공간 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년 포항산업과학기술원의 연구비 지원에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 나승민, 이종구, 이용주. (2008). 고강도 강관 버팀보 국내외 적용사례, 한국지반공학회 논문집, 제24권 제3호, pp. 34-43.
2. 유충식. (2009). H형강 버팀보 Truss 구조와 강관 버팀보 단일구조와의 거동 비교 분석, 성균관대학교, p40.
3. *Abaqus users manual*, Version 6.7. (2007). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
4. Yoo, C.S. (2001). Behavior of Braced and Anchored Walls in Soils Overlying Rock, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.3, pp. 225-233.