

강관버팀보 흙막이 시스템의 거동 특성에 관한 수치해석적 연구

Numerical Investigation on the Behavior of Braced Excavation Supported by Steel Pipe Struts

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik

나 승 민² Na, Seung-Min

이 중 구² Lee, Jong-Goo

장 동 욱³ Jang, Dong-Wook

Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation on the behavior of deep excavation wall system supported by steel pipe struts. A series of three-dimensional finite element analyses were carried out on a braced excavation case which adopted steel pipe struts. The results indicated that the mechanical behavior of the steel pipe supported braced excavation is comparable to that of a conventional H-pile supported excavation, although the steel pipe supported system allows a larger longitudinal spacing 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. This implies that the steel pipe support system can be effectively used as an alternative to conventional H-pile support system.

요 지

본 논문에서는 강관버팀보로 지지되는 흙막이 굴착 시스템의 거동에 관한 수치해석 연구내용을 다루었다. 최근 들어 적용성이 점차 늘고 있는 강관버팀보로 지지되는 흙막이 시스템의 거동특성에 관한 이해 증진의 일환으로 본 연구에서는 강관버팀보가 적용된 실제 현장 단면에 대한 3차원 해석을 수행하였으며 그 결과를 토대로 흙막이 벽체 및 버팀보, 브레이싱 시스템에 대한 3차원 거동 메카니즘을 고찰하였다. 이와 아울러 동일한 굴착단면에 대해 H-형강 버팀보 적용 조건에 추가해석을 통해 강관버팀보 적용 단면과의 직접적인 비교를 시도하였다. 그 결과 강관버팀보 적용단면의 경우 H-형강 단면과 비교하여 수평간격이 넓음에도 불구하고 거의 대등한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

Keywords : Deep excavation, Finite element analysis, Steel pipe strut

1. 서 론

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 요구

되고 있다. 현재 적용되고 있는 버팀보 흙막이 지보 시스템의 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 공

1 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)

2 정회원, 포항산업과학원 강구조연구소 책임연구원 (Member, Senior Researcher, RIST)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

법이 국내에서 도입되어 적용되고 있다. 강관버팀보 공법은 강관의 고강도(High Strength) 및 고강성도(High Stiffness)의 역학적 특성을 활용하므로 버팀보 설치 간격을 줄일 수 있으며 특히 수직 브레이싱을 생략할 수 있어 작업공간 확보가 매우 용이하다는 장점이 있다. 그림 1에서는 국외에서 강관버팀보가 적용된 현장 사진을 보여주고 있다.

강관버팀보는 이미 국외에서 우수한 경제성 및 시공성을 바탕으로 일반 지하굴착 현장에서의 사용이 일반화 되어 있다(Puller 1996, Ng et al. 2003, Kempfert and Gebreselassie 2006). 그러나 국내에서는 아직까지 현장 적용에 필요한 각종 역학적 메카니즘에 대한 이해 부족으로 극히 제한적으로 적용되고 있다. 아울러 국내에서는 이와 관련된 연구 또한 부족하여 강관버팀보 관련 연구는 그다지 많지 않은 실정이며 그나마 주로 강관의 구조적 하중 지지력 평가에 초점을 맞춘 연구가 수행된 바 있다. 즉, 김용(2007)은 지하굴착에 적용되는 원형강관의 임의 하중에서의 응력, 처짐 및 최대좌굴하중을 고찰하고 이를 H-형강과 비교하는 연구를 수행하여 강관의 하중지지 특성에 관한 내용을 연구하였다. 그 결과 H-형강과 비교하여 강관의 휨 성능은 H-형강과 거의 유사한 것으로 나타났으나 좌굴성능이 현저히 우수한 것으로 보고하였다. 한편, 최문규 등(2007)은 원형강관 버팀보의 성능과 적용성에 관한 연구를 수행하고 작업량 감소에 기인한 공기단축의 효과로 인해 적용성이 확대될 것으로 예측하였다.

이와 같이 특히 국내에서는 강관버팀보 적용 흠막이 굴착에 관련된 연구가 부족한 실정이어서 현장 적용을 위해서는 이에 관한 구체적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 지하굴착 현장에서의 강관버팀보 적용

성 제고를 위해 필요한 각종 메카니즘 이론정립의 일환으로 기 시공된 고강도 강관버팀보 적용 현장에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 강관버팀보의 역학적 효율성 및 거동 특성을 고찰하였으며 아울러 동일 현장에 기존 H-형강 버팀보가 적용되는 가상의 설계 조건에 대한 추가해석을 통해 두 지보시스템의 거동에 있어서의 차이를 고찰하였다. 아울러 두 시스템에 대해 굴착 배면의 일정면적에 재하하중이 작용하는 가상의 조건을 추가로 해석하여 하중 재하시 지지 구조의 3차원적 거동 특성을 고찰하였다.

2. 검토 대상 현장

2.1 현장 및 굴착 조건

2.1.1 대상현장 개요

그림 2는 본 연구에서 고려한 인천 ○○지구 지하차도 건설 현장에 적용된 강관 버팀보 적용 현장 단면을 보여주고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 동일한 시공조건에 대해 H-형강 버팀보가 적용되는 경우와의 상대적 비교를 위해 당 현장에 H-형강 버팀보가 적용되는 가상의 조건을 아울러 고려하였다.

그림 2에서와 같이 당 현장의 굴착깊이와 폭은 각각 13m와 30m로서 총 5단계 굴착이 이루어지는 것으로 설계 되었다. 굴착대상 지반은 표 1에서와 같이 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암으로 구성되어 있으며 대부분의 굴착은 토사지반에서 이루어지도록 되어 있다. 흠막이 벽체로는 Sheet pile이 적용되었으며 N=30 정도의 풍화토 지반에 근입 되는 것으로 설계되었다. 표 1은 지층의 지반공학적 특성치를 정리하고 있다.

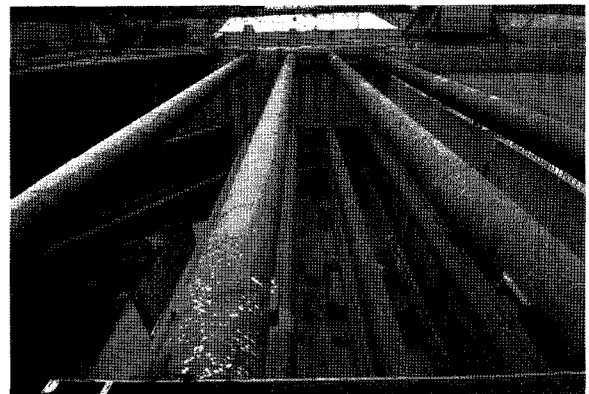
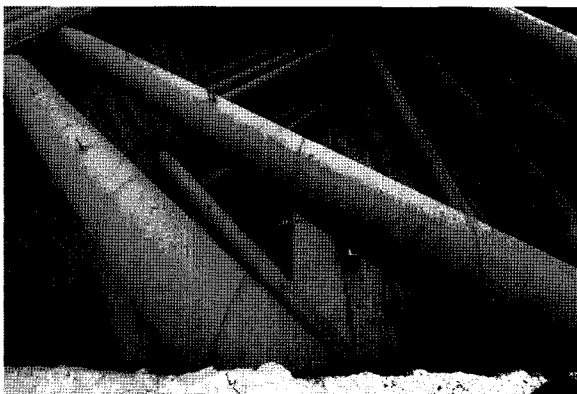


그림 1. 국외 강관버팀보 적용 굴착현장 예시

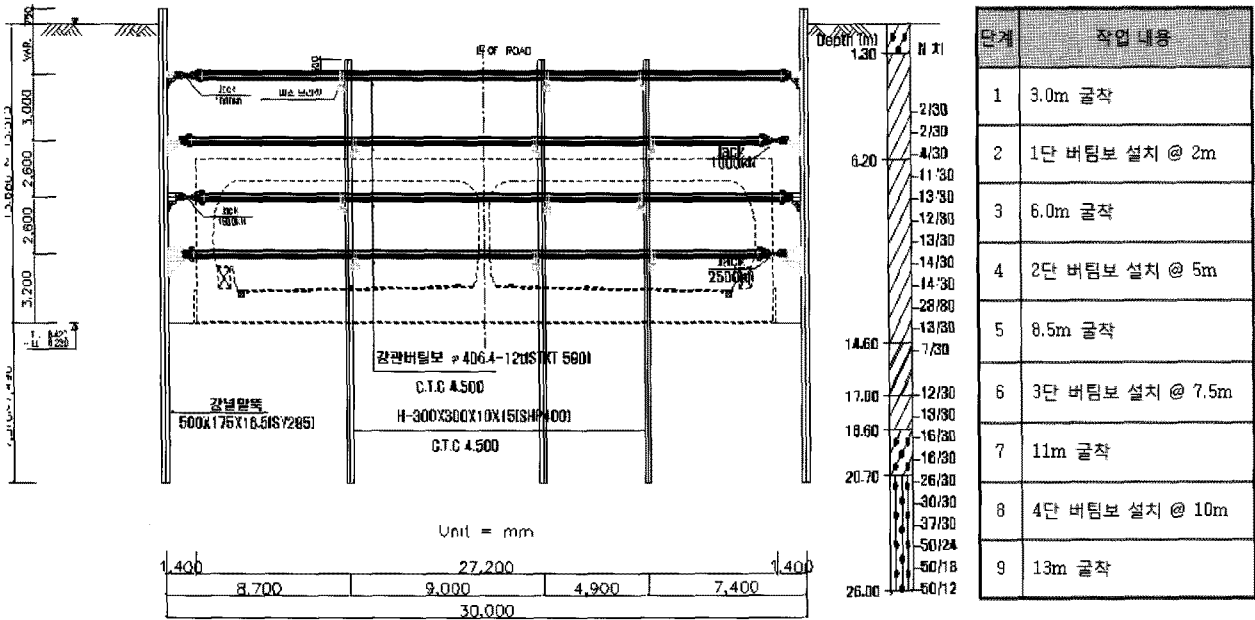


그림 2. 강관버팀보 적용 조건 단면

표 1. 지층별 역학적 특성

구분	내부 마찰각 $\phi(^{\circ})$	점착력 (kPa)	습윤단위중량 $\gamma_s(kN/m^3)$	수중단위중량 $\gamma'(kN/m^3)$	평균두께 (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	-

표 2. 버팀보 조건별 사용강재 제원

종류	강관 버팀보 지보 시스템	H-형강 버팀보 지보 시스템
벽체	SPV- 500×175×16.5 (Sheet pile)	좌동
버팀보	STKT 590 - $\Phi 406.4mm$ $t = 7mm$ (C.T.C 4.5M)	SM 490 H- 350×350×12×19 (C.T.C 2.5M)
중간말뚝	SHP 400 H- 300×300×10×15 (C.T.C 4.5M)	SHP 400 H- 300×300×10×15 (C.T.C 2.5M)
수평브레이싱	□-channel - 150×75×65×10 (SS400)	좌동
수직브레이싱	NA	ANGLE - 90×90×9 (SS400)
띠장	SM 490 H- 400×408×21×21	좌동

2.2 흙막이벽체 및 지보시스템

당 현장에 적용된 지보시스템을 살펴보면 흙막이 벽체로는 SPV- 500×175×16.5가 적용되었으며 버팀보로서 직경 400mm 벽두께 7mm의 고강도 강관(STKT 590 - $\Phi 406.4mm$ $t = 7mm$)이 각각 2.5m 및 4.5m의 수직, 수평간격으로 적용되었다. 한편, 가상의 H-형강 버팀보 적용 조건에서

는 설계 결과 SM 490 H- 350×350×12×19의 버팀보가 각각 2.5m 및 3.0m의 수직, 수평간격으로 적용되는 것으로 검토 되었다. 기타 벽체, 중간파일은 두 조건 공히 동일한 사양으로 적용되는 것으로 간주하였다. 구체적인 흙막이 지보시스템의 부재별 사양은 표 2에 정리되어 있으며 강관버팀보와 H-형강 버팀보의 구조 부재 적용에 있어 차이점은 표 3에 정리되어 있다.

표 3. 버팀보 조건별 구조부재 적용 비교

구조부재		강관 버팀보 지보 시스템	H-형강 버팀보 지보 시스템
벽체		동일	
버팀보 간격	수평	4.5m	3.0m
	수직	2.5 m	
증간말뚝		동일	
수평브레이싱		적용	적용
수직브레이싱		미적용	적용
띠장		동일	

3. 3차원 유한요소해석

3.1 개요

본 연구는 강관 버팀보 흙막이 지보 시스템에 있어 지반 및 구조 부재 거동 특성을 세부적으로 고찰하는데 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 유한요소해석 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.

3.2 해석 모델링

3.2.1 대상구간 모델링

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

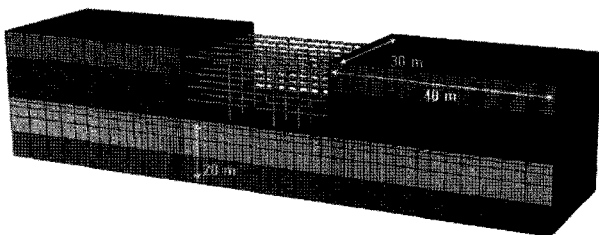


그림 3. 3차원 해석 구간 모델링 개요도

바닥으로부터 20m 하부에 설치하였으며 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 $\delta_y = 0$) 경계면에는 모든 방향의 변위를 구속하는 힌지를 설치하였다($\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0$).

한편, 지반은 8절점 가감적분 고체요소(C3D8R)를 이용하여 이산화 하였으며 재료 모델링에 있어 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Davis(1968)가 제안한 비관련흐름 법칙을 따르는 탄소성 재료로 간주하였다. 해석에 필요한 지반의 강도 정수 및 제반 물리적 성질은 표 1의 수치를 적용하였다. 또한 벽체와 배면지반 사이의 미끄러짐 거동은 Abaqus에서 제공하는 “Contact element”를 적용하여 모델링하였다.

3.2.2 흙막이 지보시스템 모델링

벽체 및 버팀보로 이루어진 흙막이 지보시스템 모델링에 있어 각 부재의 구조적 역할에 대한 상세 모델링을 통해 현실적인 해석이 수행될 수 있도록 하였다. 즉, 해석에서는 벽체 및 버팀보, 그리고 증간파일 및 수평 및 수직 브레이싱을 개별적으로 모델링하여 각각의 구조적 성능에 대한 평가를 수행하였다.

Sheet pile 벽체는 굴착과정에서 발생하는 휨저항 특성을 현실적으로 모델링할 수 있는 3차원 쉘요소(S4R)를 이용하여 모델링하였으며 이때 Sheet pile의 제원을 토대로 산정된 휨강성을 갖는 등가의 구조부재 특성을 고려하였다. 한편, 강관 버팀보 및 증간말뚝은 축방향 저항 및 휨저항을 고려할 수 있는 3차원 빔요소(B32)를 이용하여 모델링하였다. 그림 4에서는 강관 버팀보 및 증간파일, 그리고 수평브레이싱에 대한 모델을 보여주고 있다. 해석에서는 표 2에 제시된 각 부재에 대한 단면특성을 토대로 역학적 특성치를 산정하여 해석에 적용하였다.

표 4. 흠막이 시스템 구조부재 연결부 모델링

구분		모델링 방법
구조부재 연결부 모델링	버팀보-띠장	<ul style="list-style-type: none"> • 스크류잭이 있는 부분 : Hinge • 스크류잭이 없는 부분 : Fix
	버팀보-버팀보	고려치 않음
	버팀보-중간말뚝	Roller(중간말뚝과 중간말뚝의 연결은 고려치 않음)
	버팀보-수평/수직 브레이싱	Hinge

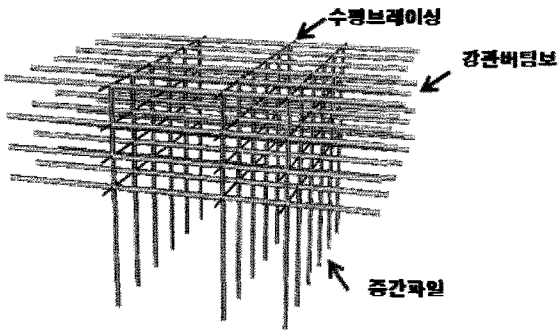


그림 4. 버팀보 모델링 상세

한편, 흠막이 시스템에 있어 전체적인 해석 결과는 버팀보와 벽체, 중간말뚝과 버팀보, 버팀보와 수평/수직 브레이싱 연결부의 경계조건 설정에 따라 차이가 있을 수가 있으므로 본 연구에서는 표 4에서와 같이 연결부에 대한 현실적인 모델링을 수행하였다.

3.2.3 시공과정 모델링

유한요소해석 모델링에서는 2장에서 언급한 단계별 굴착 및 버팀보 설치과정을 시공과정에 부합되도록 상세히 모델링 하였다. 이러한 일련의 굴착과정은 Abaqus 에서 제공하는 “Remove Element” 및 “Add Element” 기능을 활용하여 요소의 제거 및 추가 방법으로 모델링하였다. 시공과정에 대한 모델링 단계가 그림 5에 요약되어 있다.

한편, 본 연구에서는 각 버팀보 형식별로 하중 지지력에 대한 검토를 위해 굴착 완료후 굴착배면에 상재하중이 작용할 경우 버팀보 형식별 벽체 지보 시스템의 거동 특성을 고찰하였다. 상재하중은 벽체 배면에 2m 이격되어 위치하는 4.5×4.5m의 정방형 재하면적에 $q=300\text{ kPa}$ 의 균등 상재압이 작용하는 조건으로서 총 $Q=6\text{ MN}$ 의 하중이 작용하는 조건을 고려하였다. 여기서 $q=300\text{ kPa}$ 의 하중 수준은 층별 상재하중을 20kPa로 간주할 때 약

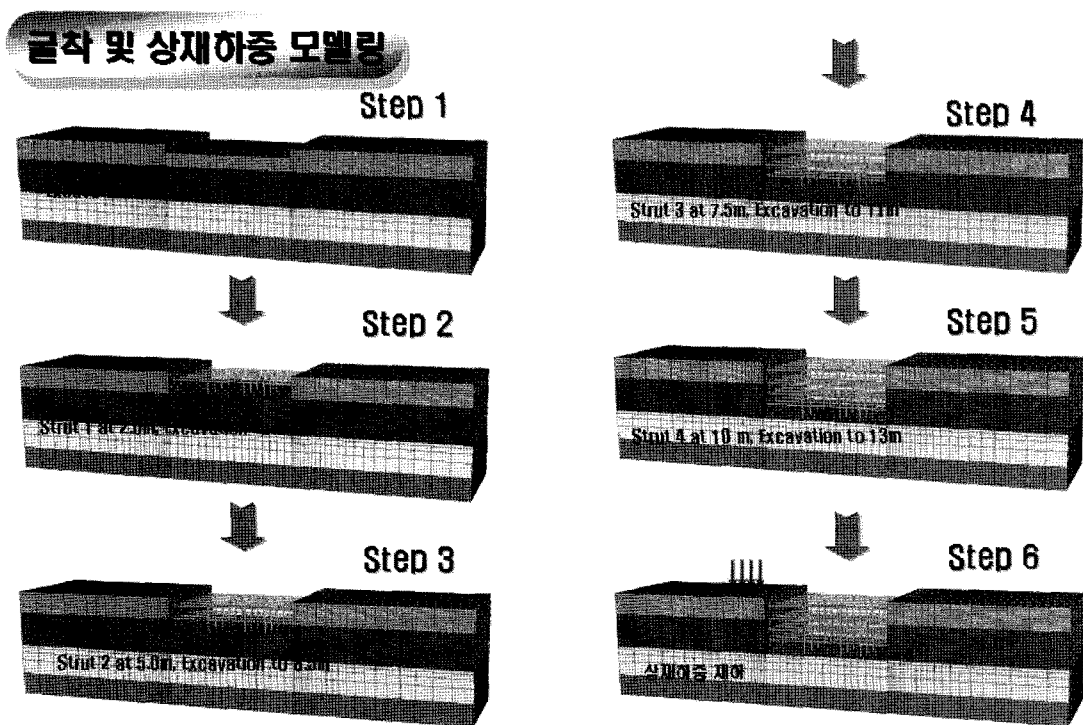


그림 5. 시공과정 모델링

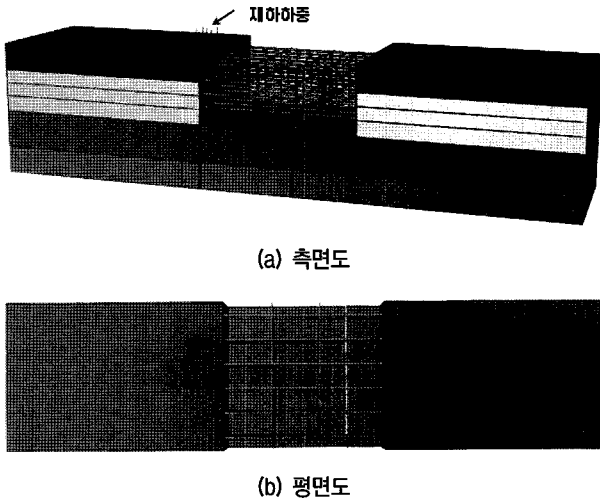


그림 6. 상재하중 재하조건 개요도

15층 정도의 건물하중을 나타낸다. 그림 6은 상재하중 재하조건을 보여주고 있다.

4. 결과 분석 및 고찰

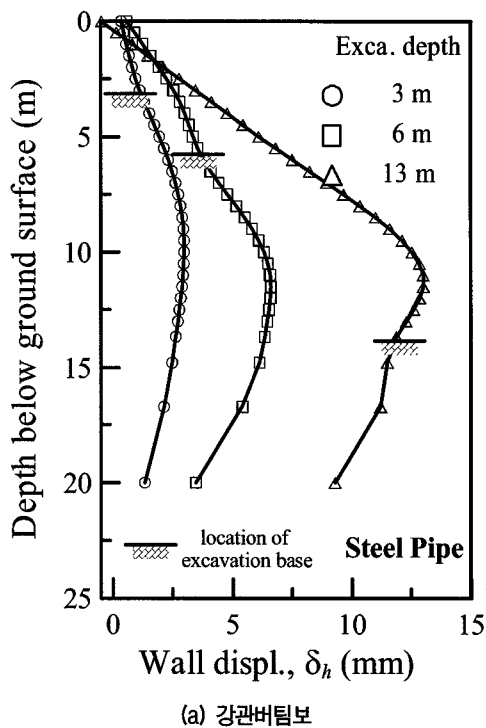
4.1 굴착 시공중 거동

4.1.1 벽체 수평변위 및 배면 침하

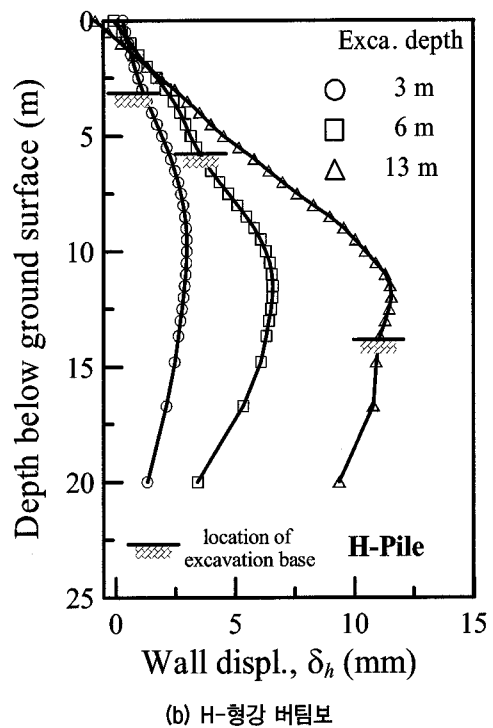
그림 7은 강관 버팀보 적용 조건과 H-형강 적용조건

의 굴착 단계별 벽체 수평변위(δ_h) 발생 경향을 비교하고 있다. 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 두 경우 모두 굴착깊이가 증가하면서 벽체 변위가 증가하는 전형적인 경향을 보이고 있으며 최종 굴착단계에서의 최대 수평변위 또한 $\delta_{h,max} \approx 13mm$, 즉 굴착깊이(H)의 약 0.1% 정도로 거의 유사하게 발생하는 것을 나타냈다. 이러한 수치는 기존의 연구(Yoo 2001)에서 보고된 국내에서 계획된 유사한 시공조건에서 발생하는 수평변위와 거의 동일한 것으로 나타났다. 굴착 단계별 굴착배면 침하(S_v) 비교하고 있는 그림 8에서는 벽체와 배면 지반사이의 상호거동을 모델링했음에도 불구하고 두 경우 공히 벽체 인접부에서는 8mm 가량의 히빙이 발생하다 약 15 m 이격된 지점에서 2mm 정도의 침하가 발생하는 경향을 보여주고 있다. 배면지반의 수평변위를 나타내는 그림 9에서는 최대 침하가 발생하는 지점에서 최대 3mm 정도의 수평변위가 발생하는 유사한 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 동일한 굴착조건에서 강관 버팀보 적용 단면의 경우 버팀보의 수평간격(4.5m)이 H-형강 버팀보(3m) 대비 약 1.5배임에도 불구하고 변위 거동이 H-형강 버팀보 적용단면과 거의 유사한 것으로 나타났는데 이러한 경향은 강관 버팀보 지지 구조가 넓은 버팀보 수평 설치간격에도 불구하고 H-형강 버팀보 설치 구조와 거의 유사한 수평 거동 억제력을 가짐을 의미하는

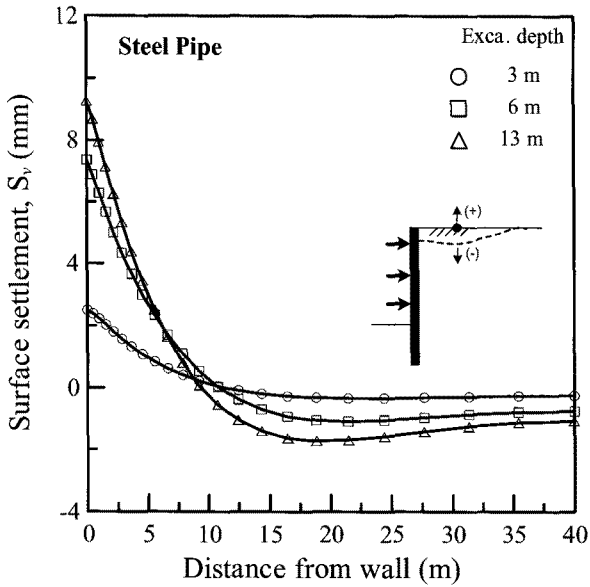


(a) 강관버팀보

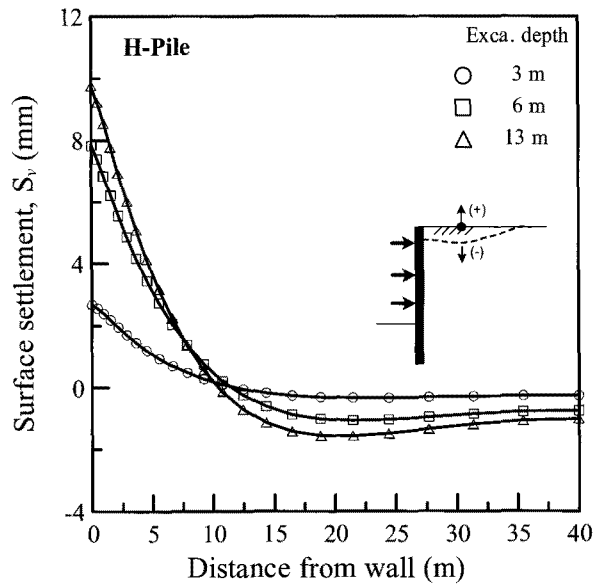


(b) H-형강 버팀보

그림 7. 굴착 단계별 벽체 수평변위

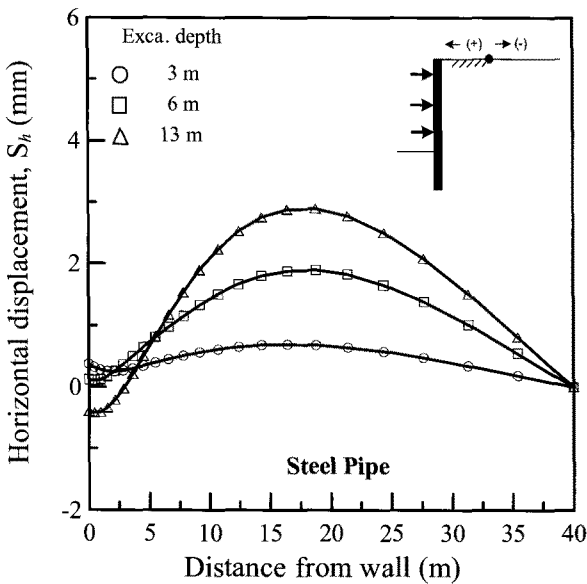


(a) 강관버팀보

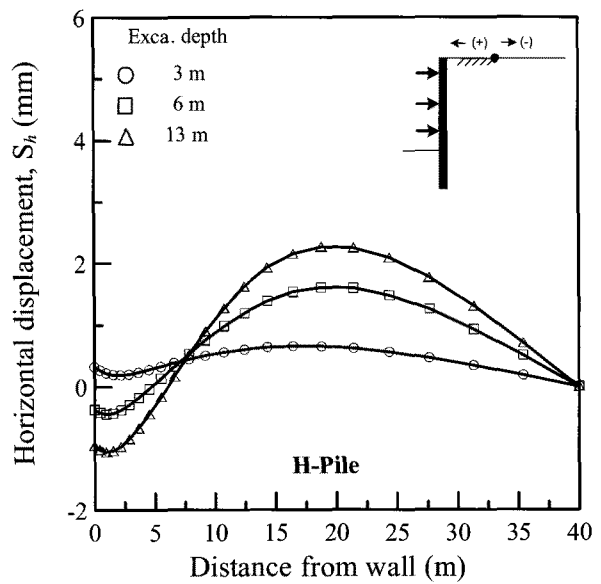


(b) H-형강 버팀보

그림 8. 굴착 단계별 벽체 배면 침하



(a) 강관버팀보



(b) H-형강 버팀보

그림 9. 굴착 단계별 벽체 배면 수평변위

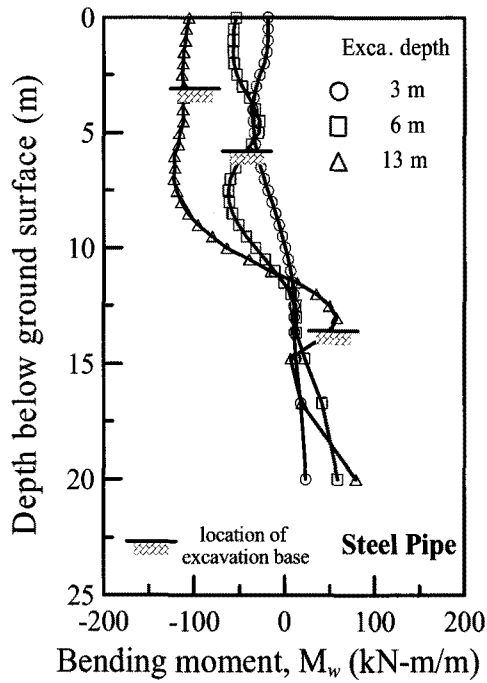
것으로서 이는 강관 버팀보가 보하는 고강도 및 강성 등 구조적 성능에 기인한다고 하겠다.

4.1.2 벽체 휨모멘트 및 버팀보 축력

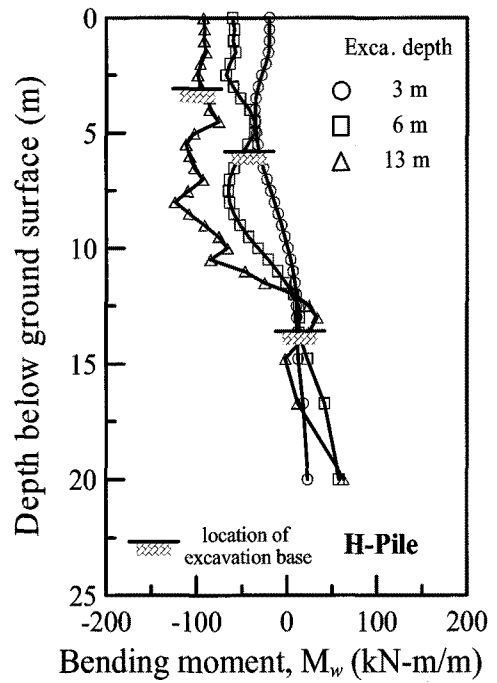
1) 벽체 휨모멘트

그림 10에서는 강관 버팀보 적용 조건과 H-형강 버팀보 적용조건에 대해 굴착 단계별 벽체 휨모멘트(M_w) 발생 경향을 비교하고 있다. 관찰할 수 있는 바와 같이 두 경우 모두 굴착깊이가 증가함에 따라 휨모멘트가 증가

하는 전형적인 경향이 거의 동일하게 나타나는 것으로 검토되었다. 또한 각 굴착단계별 최대 모우멘트($M_{w,max}$)는 두 경우 모두 약 130kN-m 정도가 발생하는 것으로 나타났는데 이를 강관 버팀보의 단면을 고려한 휨응력으로 환산하면 약 $f_b = 56.3 MPa$ 정도로서 허용 휨응력과 $f_{ba} = 243 MPa$ 을 고려할 때 약 $FS = 4.3$ 의 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 이러한 결과 역시 버팀보의 수평간격이 약 1.5배 넓게 설치된 강관버팀보 적용 지지구조가 H-형강 버팀보 적용 지지구조와 거의 유사한 성



(a) 강관버팀보



(b) H-형강 버팀보

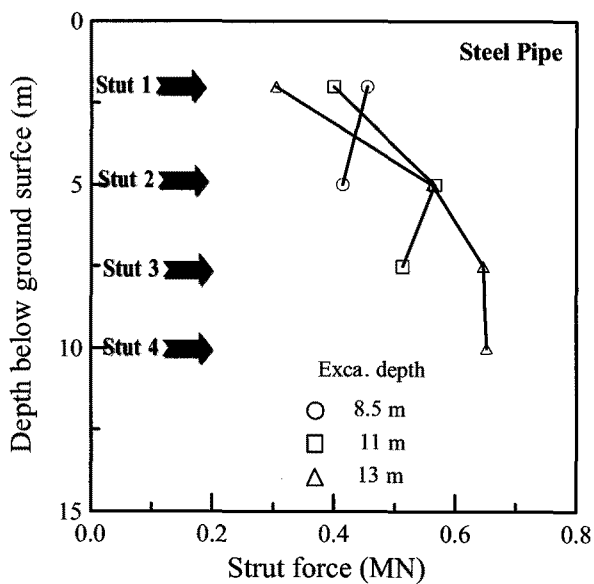
그림 10. 굴착단계별 벽체 휨모멘트

능을 발휘함을 나타내는 것으로서 강관 버팀보 지지구조의 적용시 넓은 수평간격을 유지하여도 H-형강 버팀보와 거의 유사한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 검토되었다.

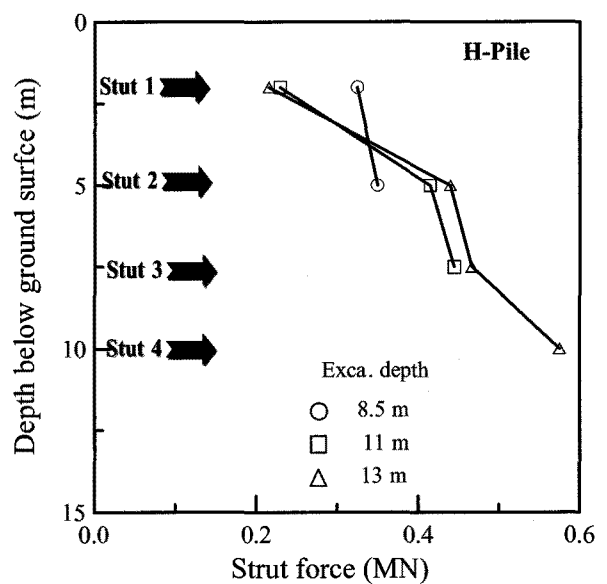
2) 버팀보 축력

그림 11에서는 강관 버팀보 및 H-형강 버팀보 적용 조건에 대해 굴착 단계별 버팀보 축력 발생 경향을 정

성·정량적으로 보여주고 있다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 정성적으로는 거의 유사한 경향을 보이고는 있으나 강관 버팀보의 수평 설치 간격이 H-형강 버팀보의 경우보다 약 1.5배 넓은 관계로 강관버팀보의 버팀보 1본당 축력이 650kN 정도로 나타나 약 600kN 정도를 보이는 H-형강 버팀보 조건에 비해 약 8% 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 강관 버팀보의 허용 압축응력

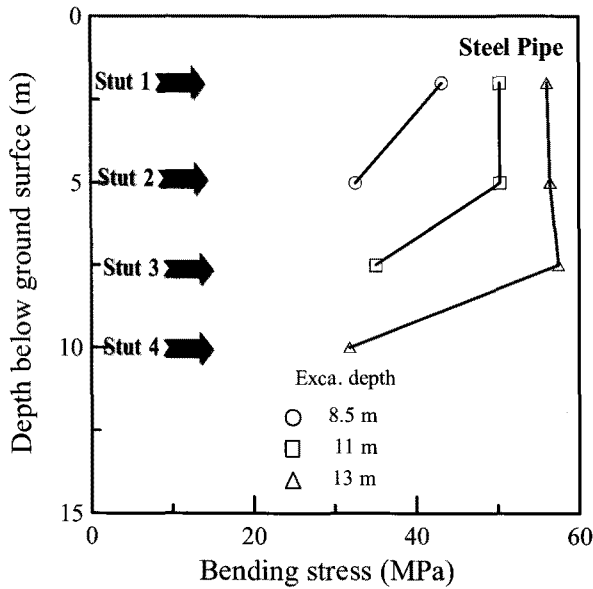


(a) 강관버팀보

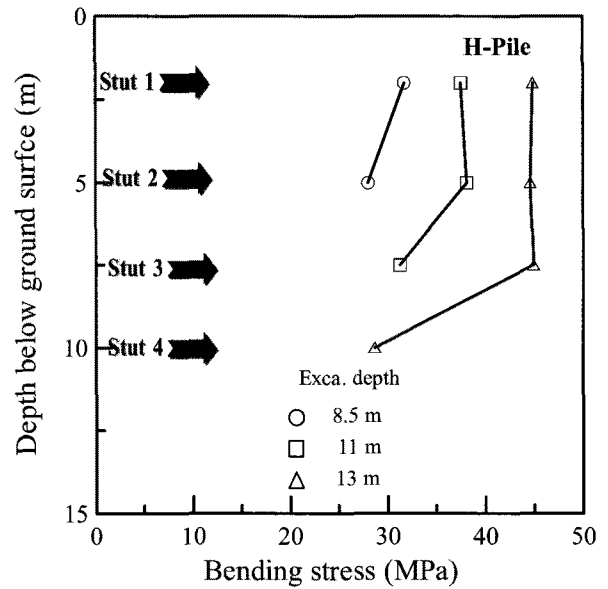


(b) H-형강 버팀보

그림 11. 굴착단계별 버팀보 축력



(a) 강관버팀보



(b) H-형강 버팀보

그림 12. 굴착단계별 강관버팀보 휨응력

($f_{ca} = 205MPa$)이 H-형강 버팀보($f_{ca} = 128MPa$)에 비해 60%이상 크기 때문에 안전율에 있어 강관 버팀보 적용조건이 다소 큰 안전율을 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.

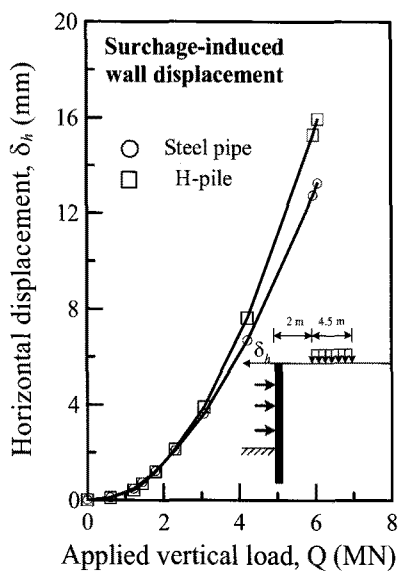
한편, 그림 12는 버팀보에 발생하는 휨 압축응력을 도시하고 있다. 보이는 바와 같이 강관 버팀보의 휨 압축응력($55MPa$)이 H-형강 버팀보의 휨 압축응력($45MPa$)에 비해 약 20%정도 크게 발생하는 것으로 나타났으나 각 부재의 허용휨응력을 토대로 안전율을 산정하면 강관 버팀보의 경우 $FS = \frac{f_{ba}}{f_b} = \frac{337}{55} = 6.1$, H-형강 버팀보의

경우 $FS = \frac{f_{ba}}{f_b} = \frac{185}{45} = 4.1$ 을 확보하는 것으로 나타나 강관버팀보의 경우가 더 큰 안전율을 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.

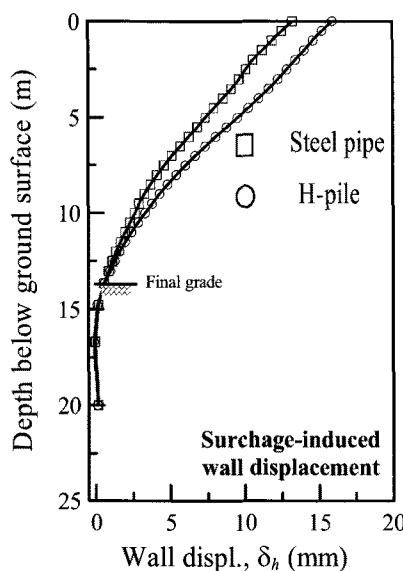
4.2 상재하중 재하시 거동

4.2.1 벽체 변위 및 휨응력

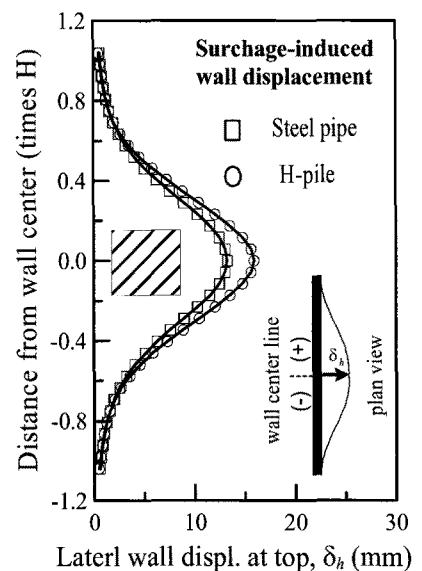
그림 13은 상재하중 재하로 발생한 벽체 변위 발생경향을 다양한 각도에서 도시하고 있다. 보이는 바와 같이



(a) 재하 단계별 최대 변위



(b) 벽체 변위 프로파일



(c) 종방향 벽체 수평변위

그림 13. 버팀보 형식에 따른 상재하중 재하시 벽체 변위

재하하중 $Q=6\text{ MN}$ 에 대해 강관 버팀보 적용조건이 다소 큰 변위를 보이고는 있으나 두 경우 모두 거의 유사한 변위 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 그림 14에서는 상재하중 재하시 벽체 휨모멘트를 도시하고 있는데 보이는 바와 같이 추가로 발생하는 벽체 휨모멘트 역시 정량적인 차이가 그다지 크지 않아 상재하중이 벽체 지지구조에 미치는 영향은 거의 같은 것으로 분석되었다.

정량적으로 살펴보면 $4.5 \times 4.5\text{ m}$ 재하면적에 $Q=6\text{ MN}$ 의 하중이 작용함에 따라 벽체 최상단에서 최대 14~16mm 정도의 변위가 추가적으로 발생하는 것으로 나타났으며 이때 추가로 발생하는 벽체 휨모멘트는 약 $100\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 로서 전반적으로 안정한 것으로 나타났다. 또한 상재하중 재하 중심에서 좌우로 굴착깊이(H_{ex})의 약 $\pm 0.4H_{ex}$ 정도 구간에서 변위가 집중적으로 발생하는 것으로 검토되어 영향범위는 $\pm 0.4H_{ex}$ 정도로 간주할 수 있는 것으로 나타났다.

관찰한 바와 같이 전반적으로 H-형강 버팀보 적용 단면이 벽체 변위 및 휨모멘트 등에서 14% 작게 발생하는데 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 강관버팀보 적용 단면의 버팀보 수평설치 간격이 H-형강 버팀보 적용 단면 대비 1.5배 정도 넓기 때문이라고 할 수 있다. 그러나 강관버팀보 적용시 버팀보의 수평설치 간격을

넓힘에 따른 버팀보 설치 수량 감소에도 불구하고 벽체 변위나 휨모멘트에서 H-형강 버팀보의 경우와의 차이가 미미한 것으로 나타나 현재 적용하는 강관버팀보 시스템의 경우 충분한 하중 지지력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

4.2.2 버팀보 축력

그림 15와 16은 상재하중 재하시 버팀보 축력 증가 경향을 각각 강관 버팀보 적용 단면과 H-형강 버팀보 적용 단면에 대해 비교하고 있다. 여기에서는 상재하중의 영향을 고찰하고자 상재하중 재하로 인한 축력 증분(ΔF)을 도시하였다.

먼저 해석단면 중앙부에 설치된 버팀보 축력 발생 결과를 비교하고 있는 그림 15를 관찰하면 두 경우 모두 최대 축력 증분은 최상단 버팀보(ST1)에서 발생하는 경향을 보이고 있으나 정량적으로는 두 경우 모두 500 kN 정도의 축력이 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 벽체와 평행한 평면에서의 버팀보별 축력 증분 발생경향을 보여주고 있는 그림 16을 관찰하면 전체적으로 상재하중 재하면적 중심에서 약 $\pm 0.4H_{ex}$ (H_{ex} =굴착깊이) 구간에서 축력증분이 집중되는 것으로 나타났으며 그 영역 외부에서는 50 kN 이하의 축력 증분이 발생하는 것으로 나타나 주 영향영역은 재하하중 중심으로 부터 $\pm 0.4H_{ex}$ 이

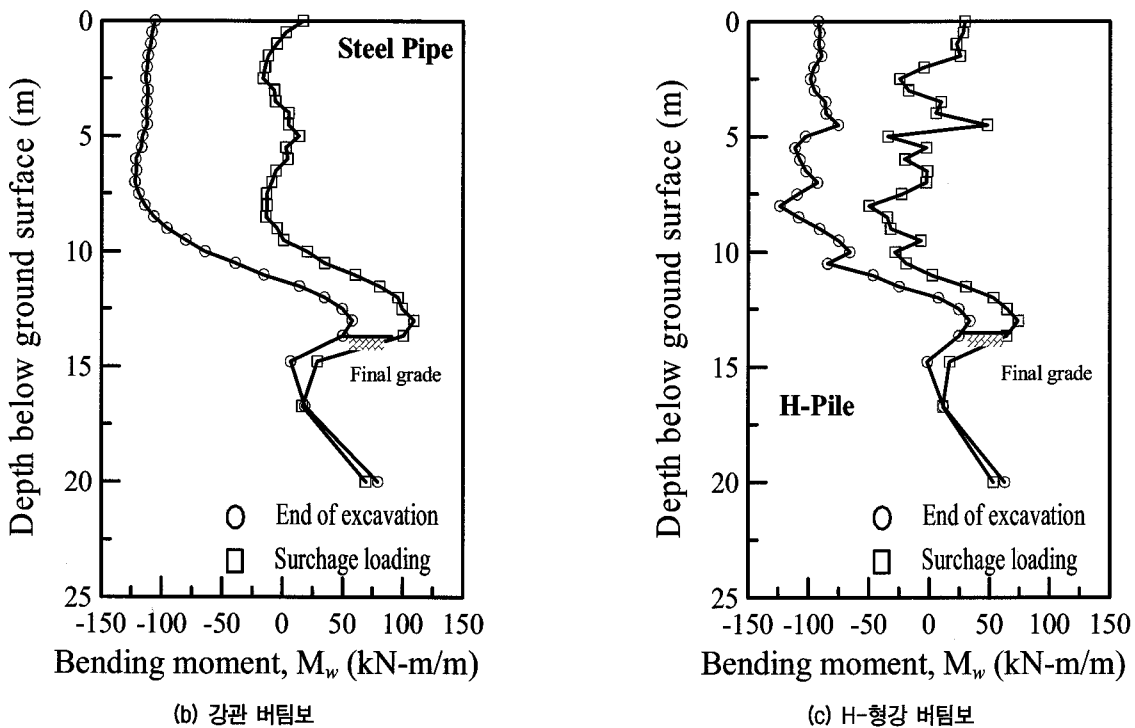
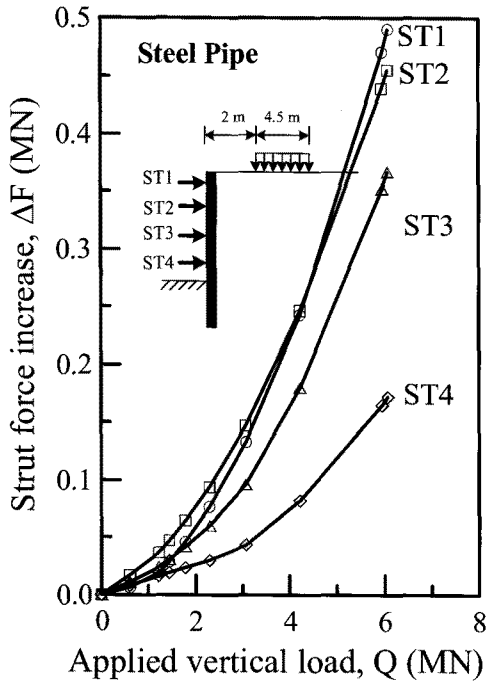
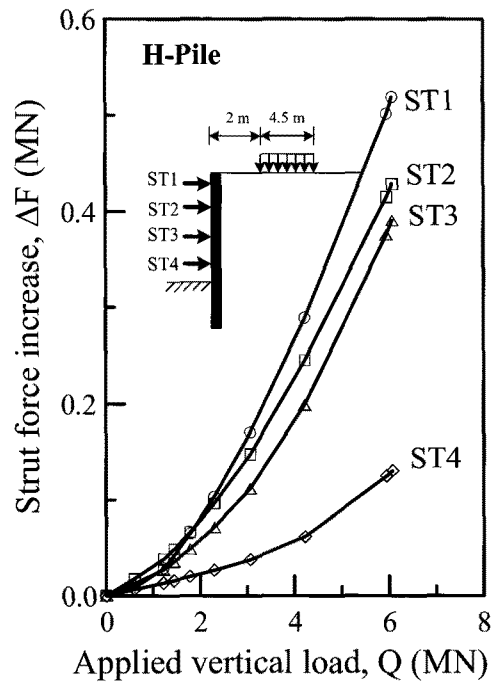


그림 14. 상재하중 재하로 인한 벽체 휨모멘트

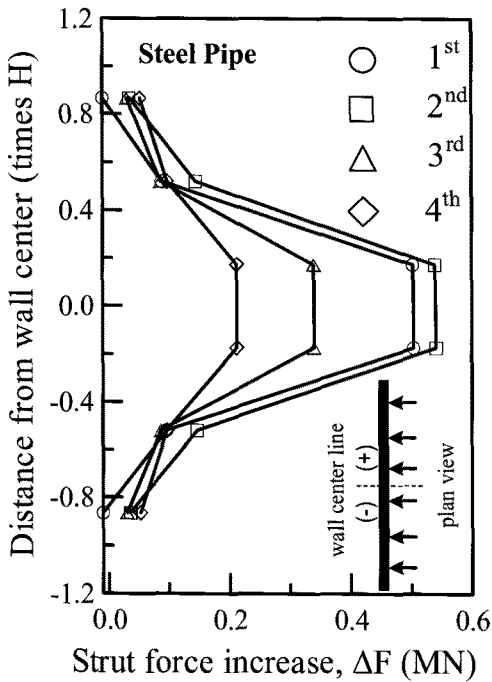


(a) 강관버팀보

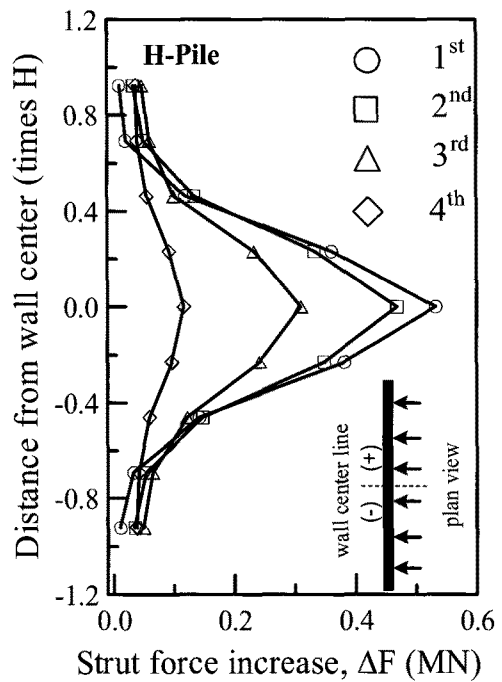


(b) H-형강 버팀보

그림 15. 상재하중 재하로 인한 버팀보 축력 발생경향 - 단면중심



(a) 강관버팀보



(b) H-형강버팀보

그림 16. 상재하중 재하로 인한 버팀보 축력 발생 경향 - 종방향

내의 영역으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

위 결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이 H-형강 버팀보 적용단면의 경우 버팀보 수평설치간격이 강관 버팀보 적용 단면에 비해 50% 이상 넓음에도 불구하고 축력 증가량은 강관버팀보의 경우와 큰 차이를 보이지 않는

것으로 나타났다. 이러한 경향은 고강도의 강관버팀보 적용시 수평 설치간격을 넓혀도 기존의 H-형강 버팀보 적용 단면과 거의 유사한 하중 지지성능을 발휘 할 수 있음을 나타낸다고 하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 강관 버팀보 적용 흙막이 시스템의 실무적용 활성화에 필요한 각종 매카니즘 이론정립을 위해 기 시공된 시공조건에 대해 고강도 강관버팀보 적용 조건 및 H-형강 강관버팀보 적용조건에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 두 지보시스템의 거동 차이를 고찰하고 나아가 고강도 강관버팀보 공법의 효율성 및 역학적 거동 특성을 고찰하였다. 해석모델링에서는 벽체-버팀보, 버팀보-수평/수직브레이싱 등의 연결부를 상세히 모델링하였으며 아울러 두 시스템에 대해 굴착 배면의 일정면적에 재하하중이 작용하는 조건을 추가로 해석하여 하중 재하시 지지 구조의 3차원적 거동 특성을 고찰하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동일한 시공조건에 대해 강관 버팀보 지지구조와 H-형강 버팀보 지지구조를 비교한 결과 벽체 변위 및 주변 지반 거동의 측면에서는 지지구조 형식별로 큰 차이를 보이지 않았으며 벽체 및 버팀보 등 지지구조의 단면력 또한 H-형강 버팀보 지지구조와 비교할 때 거의 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 강관 버팀보 지지구조에 있어 버팀보가 H-형강 버팀보 지지구조 형식에 비해 1.5배 정도의 수평간격으로 설치되더라도 거의 동등한 구조적 성능을 발휘함을 의미한다.
- (2) 상재하중 재하시 굴착조건에 있어 강관버팀보 형식과 H-형강 버팀보 형식을 결과를 비교한 결과 벽체 변위 및 휨모멘트 측면에서는 강관버팀보 형식이 20%정도 크게 발생하는 것으로 분석되었으나 버팀보 축력에서는 거의 유사하게 발생하는 것으로 나

타났다. 이러한 결과는 강관버팀보 지지구조가 H-형강 버팀보 지지구조 형식에 비해 1.5배 정도의 수평간격으로 설치되더라도 기존의 H-형강 버팀보 구조 형식과 거의 대등한 하중지지력을 보이는 점을 의미하며 이를 감안할 때 강관버팀보 적용시 넓은 수평간격으로 인한 작업공간 확보 등의 우수한 시공성과 현장 적용성을 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학원의 연구비지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김용 (2007), *지하굴착용 버팀보에 사용하는 원형강관이 구조특성에 관한 실험적 연구*, 명지대학교, 석사학위 논문.
2. 최문규, 이종성, 송치용 (2007), 원형강관 버팀보의 성능과 적용성, *한국지반공학회지*, 제23권 제10호, pp.34-40.
3. *Abaqus users manual*, Version 6.7. (2007), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
4. Davis, E. H. (1968), Theories of plasticity and the failure of soil masses. *Soil mechanics: Selected topics*, Butterworth's London, U.K., pp.341-380.
5. Kempfert, H.G and Gebreselassie, B. (2006), "Excavations and Foundations in Soft Soils", Springer.
6. Ng, C.W.W., Simons, N., and Menzies, B. (2003), *Soil-structure engineering of deep foundations, excavations, and tunnels*, Tomas Telford.
7. Puller, M. (1996), *Deep Excavations - a practical manual*, Tomas Telford.
8. 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.

(접수일자 2010. 4. 12, 심사완료일 2010. 6. 19)