Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.27, No.4, pp.411-422, August, 2015

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2015.27.4.411

고강도 강관과 PHC파일이 활용된 흙막이 버팀보의 좌굴해석 및 설계

임승현[1] · 김인규[2] · 김성보[3*]

[1]석사과정, 충북대학교 토목공학부, [2]석사, 충북대학교 토목공학부, [3]교수, 충북대학교 토목공학부

Design and Buckling Analysis of Earth Retaining Struts Supported by High Strength Steel Pipe and PHC Pile

Lim, Seung Hyun[1], Kim, In Gyu[2], Kim, Sung Bo[3*]

[1]Master's Course, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea
[2]Mater of Engineering, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea
[3]Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

Abstract - The design and buckling behavior of earth retaining system supported by high strength steel pipe and PHC pile under compression is presented in this study. Buckling analysis of various strut system was investigated according to the strut total length(30m, 60m, 90m), three types of built-up columns and connection condition. Buckling loads calculated by F.E analysis was compared with the theoretical solution corresponding to diagonal buckling mode, local and global buckling mode of main strut. The design of the built-up column struts are performed based on design guide for high strength steel pipes and P-M diagram for built-up column with two PHC pile section.

Keywords - Design, Buckling analysis, Earth retaining strut, High strength steel pipe, PHC pile

1. 서 론

도시의 인구집중현상으로 인해 도심지의 지상 공간이 부족함에 따라 고층건물, 지하철, 지하 주차장 등 지하구조물 시공이 증가하고 있다. 굴착 심도와 규모가 증가하면서 지하구조물 건설을 위한 대규모 흙막이 가시설에 사용되는 버팀보는 큰 압축력을 받는 부재로써 단일 압축부재 또는 버팀보의 단면 2차 모멘트를 증가시키기 위해 단일재를 서로 연결한 조립식 압축재가 사용된다. 이러한 조립기둥의 압축내하력은 전단변형효과가 고려된 버팀보의 전체좌굴하중, 사재와 수직재의 부재좌굴하중, 수직재 사이에서 발생하는 주부재의 국부좌굴하중에 따라 결정된다.

Timoshenko and Gere[1]는 전단력을 고려한 조립형태에 따른 압축부재의 좌굴하중을 제시하였으며, Galambos[2]는 조립기둥의 전단변형 효과를 보다 자세히 연구하였다. Yoo *et al.*[3]이 강관버팀보 흙막이 시스템의 거동 특성에 관한 수치 해석적 연구를 수행하였으며 Kim and Kim[4]은 강재 조립기둥의 좌굴거동에 대한 매개변수 해석을 수행하였다.

버팀보에 압축재로써 주로 사용되는 H-beam은 굴착 심도가 깊어질수록 버팀보의 간격이 좁아지고, 이를 조립기둥으로 연결했을 경우 많은 수의 연결재가 체결되므로 공기 및 공사비를 높이는 원인이 되고 있다. 원형강관은 H-beam에 비해 단면형상이 원형으로 일정하여 강축, 약축의 구별이 없고, 좌굴과 비틀림에 대해 유리하다. 이에 따라 최근 기존의 H-beam 버팀보 대신에 고강도 강관 파이프를 이용한 버팀보 공법이 사용되고 있다. 최근 고강도 강재에 대한 연구가 활발히 진행중에 있으며, 원형강관의 구조적인 거동 및 강도에 관한 연구는 Kang and Kwon[5]이 진행하였고, HSB600 원형강관 기둥의 거동에 대한 실험적 연구를 Kim *et al.*[6]등

Note.-Discussion open until February 28, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 8, 2015; revised June 18, 2015; approved on July 31, 2015.
Copyright ⓒ 2015 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-43-261-3241 Fax. +82-43-275-2377
E-mail. sbkim@chungbuk.ac.kr

이 수행하였다.

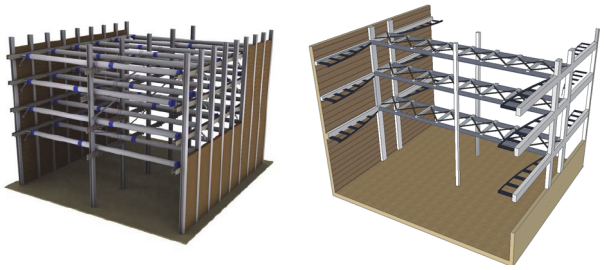
Park *et al.*[7]은 고강도 강재보의 비탄성 횡-비틀림좌굴 제어를 위한 횡지지 거리에 대한 연구를 발표하였다.

건설현장에서 기초말뚝으로 주로 사용되는 PHC pile (Pretensioned spun High strength Concrete pile)은 원심력을 이용하여 만든 콘크리트 압축부재이다. 원형강관은 가격이 고가이고 길이가 길어질수록 내하력이 감소하는 문제가 발생한다. 하지만 PHC pile을 사용할 경우 콘크리트의 큰 압축 내하력으로 인해 효율적인 버팀부재의 사용이 가능하며, 원형강관보다 1/6 수준인 가격으로 인한 경제적인 효과를 기대할 수 있다. PHC pile을 기둥재로 적용하기 위한 실험적 연구는 Kim *et al.*[8]의 연구가 발표되었고, PHC pile의 수직형 볼트 이음공법에 대한 실험적 연구는 Choi *et al.*[9] 등이 발표하였다.

본 논문에서는 고강도 강관 및 PHC Pile이 압축부재로 사용된 흙막이 버팀보에서 조립기둥의 형태에 따른 좌굴거동에 대한 영향을 평가하였다. 흙막이 버팀보를 구성하는 단부사재 및 주부재의 국부좌굴하중 그리고 버팀보의 전체 좌굴하중을 유한요소해석 및 엄밀해로부터 산출하여 전체길이, 연결형식, 조립형태에 따른 강도를 계산하였고, 이를 바탕으로 고강도 강관의 설계 기준에 부합하는 사재좌굴, 주부재 국부좌굴, 버팀보의 전체좌굴에 대응하는 흙막이 버팀보의 설계축력을 도출하였다. 또한 PHC pile이 활용된 조립기둥의 P-M상관도를 작성하고 이를 이용하여 주부재가 PHC pile인 경우 버팀보의 압축강도에 대한 설계를 수행하여 적용 가능성을 확인하였다.

2. 굴착현장의 흙막이 버팀보

Fig. 1(a)에서와 같이 굴착 현장의 터파기 깊이가 증가함에 따라 버팀보에 작용하는 토압이 증가한다. 이에 따라 버팀 부재 수의 증가가 요구되며 버팀 부재 보강에 많은 노력을 필요로 하게 된다[10]. 또한 대규모 굴착현장에서는 버팀보의 길이가 증가하여 Fig. 1(a)와 같이 단일 강관을 버팀보로 적용하기가 불가능하다. 굴착면의 토압을 지지하기위하여 H형강에 강선을 배치하여 프리스트레스를 도입한 가시설 공법(IPS, Inovative Prestressed Support)을 이용하여 버팀보의 수를 대폭 줄이고 설치간격을 늘려서 지하공간에서의 작업환경을 개선할 수 있다[11]. 기존의 IPS 공법에서 케이블 지점부에 설치되는 버팀보는 H-형강이 상부 덮개판과 함께



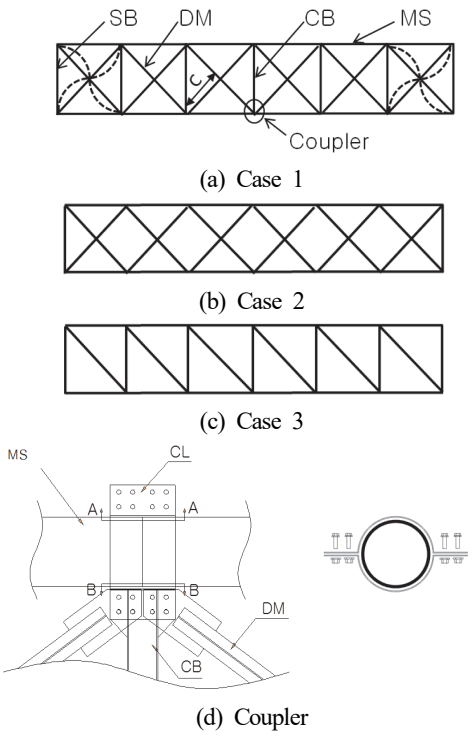
(a) Steel pipe strut[8] (b) Built-up column strut

Fig. 1. Earth retaining strut type

사용되었다. 하지만 Fig. 1(b)와 같이 굴착평면이 대형화되면서 케이블 지점부의 압축력이 증가하여 보다 고강도의 대형화된 버팀보의 개발이 요구된다.

2.1 조립식 흙막이 버팀보의 형식

결합형식에 따른 버팀보의 좌굴거동을 분석하기 위하여 Fig. 2(a),(b),(c)와 같이 세 가지 형태의 버팀보를 제시하였다. (a)는 주부재(Main Strut, MS)와 수직재(Cross Beam, CB), 사재(Diagonal Member, DM)를 모두 연결한 형태이고, (b)는 (a)에서 수직재를 제거한 형태, (c)는 (a)에서 사재 한 개를 제거한 형태이다.



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Coupler

Fig. 2. Built-up column Strut type

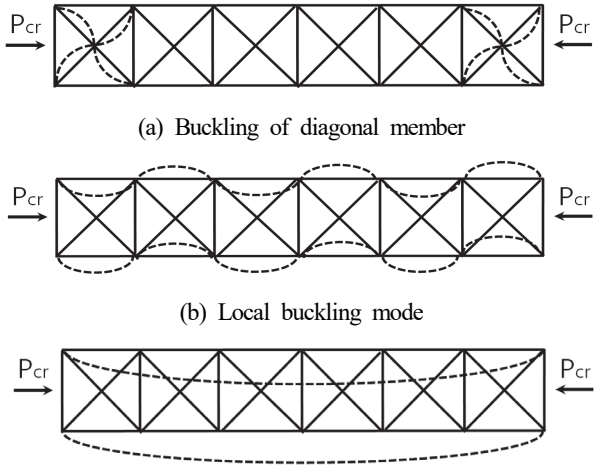
버팀보의 길이가 길어지면서 주부재 전체길이를 단일통관으로는 적용이 어렵기 때문에 단일 강관을 연결하기 위한 커플러가 필요하다. 커플러를 활용한 경우 강관버팀보의 이음부는 강관의 압축성능을 저하시키지 않으며 좌굴응력은 일정하다는 연구가 발표되었다[12]. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2(d)와 같이 기존의 커플러를 수직재와 사재를 연결할 수 있도록 개선하여 조립식 흙막이 버팀보에 활용하였다.

2.2 조립기둥의 좌굴 거동

Fig. 3에 흙막이 버팀보에서 발생하는 좌굴거동이 도시되었다. Fig. 3(a)는 사재에 좌굴이 발생했을 때의 좌굴거동이며, Fig. 3(b)는 주부재에 국부적으로 좌굴이 발생하였을 때의 좌굴모드, Fig. 3(c)는 주부재의 전체적인 좌굴이 발생하였을 때를 도시화하였다. Fig. 3(a)와 같이 사재에 좌굴을 발생시키는 전체 버팀보의 축력은, 사재의 길이가 c 일 때 좌굴하중 P_{dm}으로부터 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 조립기둥에서 사재에 좌굴을 발생시키는 압축력 P_{cr}은, 식 (1)로 계산된 P_{dm}을 조립기둥 전체에 단위하중을 재하하였을 때 발생하는 사재축력 p로 나누어 식 (2)와 같이 계산된다.

$$P_{dm} = \frac{\pi^2 E_d I_d}{(k_d \times c)^2} \tag{1}$$

$$P_{cr} = \frac{1}{p} \times P_{dm} \tag{2}$$



(a) Buckling of diagonal member

(b) Local buckling mode

(c) Global buckling mode

Fig. 3. Buckling mode of built-up column

여기서, E_d : 사재의 탄성계수
I_d : 사재의 단면 2차 모멘트
c : 사재의 길이
p : 조립기둥 전체에 단위하중 재하시 발생하는 사재축력
k_d : 사재좌굴에 대한 유효길이 계수

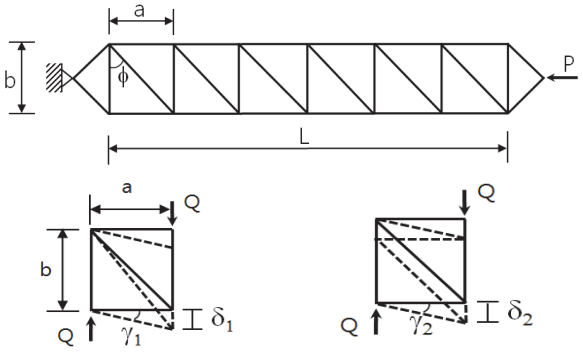
Fig. 3(b)에서처럼 주부재에 국부적인 좌굴을 발생시키는 버팀보의 전체축력은, 수직재 간격이 a일 때 식 (3)과 같은 단일압축부재에 대한 좌굴하중 P_{ms}으로부터 식 (4)와 같이 도출된다.

$$P_{ms} = \frac{\pi^2 E_m I_m}{(k_m \times a)^2} \tag{3}$$

$$P_{cr} = 2 \times P_{ms} \tag{4}$$

여기서, E_m : 주부재의 탄성계수
I_m : 주부재의 단면 2차 모멘트
a : 수직재의 간격
k_m : 주부재 국부좌굴에 대한 유효길이 계수

Fig. 3(c)에서 주부재에 전체적인 좌굴을 발생시키는 좌굴하중은 기둥에 발생되는 전단변형의 효과로 인해 조립형태에 따라 달라진다. 또한 강관의 강종이나 두께, 길이, 반지름 등의 변화가 발생할 때 강관의 전단좌굴응력은 변화를 하며 이에 대한 연구를 Mha and Choi[13]이 매개변수해석을 통한 연구를 수행하였다. Fig. 4와 같은 laced column의 경우



(a) Deformation of DM (b) Deformation of CB

Fig. 4. Shear deformation of laced columns

전단변형효과에 의한 임계하중은 식 (5)와 같다[1].

$$P_{cr} = \frac{P_E}{1+\frac{P_E}{P_d}} \tag{5}$$

식 (5)에서 P_E는 Euler 임계하중이고, P_d는 조립기둥의 전단력(Q)와 전단변형(γ)에 대응하는 전단강성으로써 $P_d = \frac{Q}{\gamma}$와 같다. Fig. 4(a)에서 전단변형은 사재와 수직재의 길이변화에 의해 계산된다. 절점이 힌지로 가정될 때 전단력 Q로 발생된 경사부재 및 수직재의 축변형에 따른 횡변위는 $\delta_1 = \frac{Qa}{A_d E \sin\phi\cos^2\phi}$와 $\delta_2 = \frac{Qb}{A_b E}$이며, A_d와 A_b는 각각 사재 및 수직재의 단면적이다. 전단력 Q에 의해서 생성된 전체 각 변위는 식 (6)과 같으며 이를 정리하여 식 (7)과 같이 전단강성을 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\delta_1+\delta_2}{a} = \frac{Q}{A_d E \sin\phi\cos^2\phi} + \frac{Qb}{aA_bE} \tag{6}$$

$$\frac{1}{P_d} = \frac{\gamma}{Q} = \frac{1}{A_d E \sin\phi\cos^2\phi} + \frac{b}{aA_bE} \tag{7}$$

식 (7)을 식 (5)에 대입하면, Fig. 2(c)와 같은 버팀보에서의 임계하중은 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 식 (8)은 두 개의 주부재가 하나의 사재로 연결 되었을 때의 임계하중이고, Fig. 2(a)와 같이 두 개의 주부재에 두 개의 사재가 연결 되었을 때는 식 (9)와 같이 사재의 단면적을 두배하여 임계하중을 계산할수 있다. Fig. 2(b)와 같이 수직재가 없는 경우 수직재의 항이 포함된 A_b의 항은 무시되고, 사재의 단면적은 두 배가 되어 식 (10)와 같이 좌굴하중이 계산된다.

$$P_{cr3} = \frac{P_E}{1+P_E\left(\frac{1}{A_d E \sin\phi\cos^2\phi} + \frac{b}{aA_bE}\right)} \tag{8}$$

$$P_{cr1} = \frac{P_E}{1+P_E\left(\frac{1}{2A_d E_d \sin\phi\cos^2\phi} + \frac{b}{aA_c E_c}\right)} \tag{9}$$

$$P_{cr2} = \frac{P_E}{1+\frac{P_E}{2A_d E_d \sin\phi\cos^2\phi}} \tag{10}$$

3. 유한요소 해석

3.1 모델링

조립기둥에서 연결재의 연결방식 및 주부재의 종류에 따른 좌굴하중을 분석하기위해 MIDAS Civil을 사용하여 좌굴해석을 수행하였다. 실제 시공단계에서는 면외로 발생되는 좌굴을 제어하기 위한 수직중간파일이 설치되므로 해석에서는 X-Y 평면 거동만 허용하였고, 주부재의 축방향을 X축, 횡방향을 Y축으로 설정하였다.

Fig. 5에서 지점조건은 가력부(ⓐ,ⓑ,ⓒ,ⓓ)에서는 종방향(X축)변위가 발생하도록 하였고, 중앙부(ⓔ,ⓕ)에서는 좌우 대칭적인 좌굴모드를 발생시키기 위해 X축 변위를 고정하였다. 하중조건은 중심 축하중을 받을 수 있도록 ⓐ,ⓒ 지점에 0.5kN, ⓑ,ⓓ지점에 -0.5kN의 하중을 재하하였다. 해석모델의 모든 부재는 보요소가 사용되었으며 사용된 부재의 제원은 Table 1과 같다.

조립기둥의 전체길이 L은 30m, 60m, 90m 로 각각 모델링 하였으며 수직재의 간격 a는 5m로, 길이 b는 4m로 설정하였다.

모든 부재는 서로 고장력 볼트로 체결되고, Fig. 6과 같이 실제 시공에서 압축부재와 흙막이 벽의 연결을 고려하여 단부(SB)와 주부재는 서로 Hinge 연결을 하였고, 수직재와 사

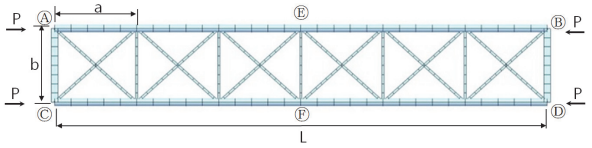
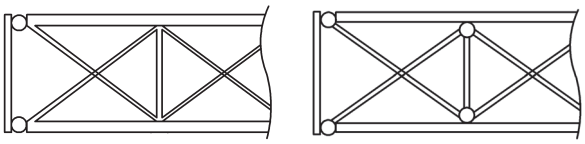


Fig. 5. FEM model

Table 1. Element properties of beam model

Name	Material property	Section (mm)
MS	STKT590	Φ406×12
	PHC	Φ400×65
DM	SM490	H-125×125×6.5×9
CB	SS400	C-125×65×6×8
SB	SS400	H-400×400×13×21



(a) Rigid model (b) Hinge model

Fig. 6. Connection condition

재의 연결방식은 Rigid연결과 Hinge연결 두 가지 연결형식에 따른 좌굴거동의 비교를 하였다.

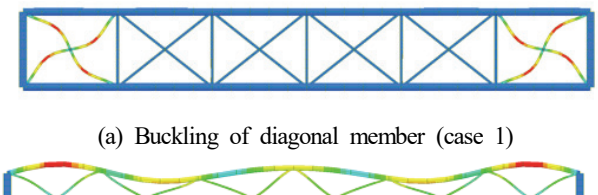
3.2 좌굴해석 결과

Fig. 2의 세 가지 버팀보 형식(Case1, Case2, Case3), Fig. 6의 두 가지 연결형식(Rigid, Hinge), 주부재의 종류(강관, PHC pile), 버팀보의 길이(30m, 60m, 90m)에 따라 구분하여 좌굴해석을 수행하였고, Fig. 7과 같이 각각의 좌굴모드에 대한 버팀보의 좌굴하중을 도출하였다.

버팀보의 최초 좌굴모드는 전체길이가 30m와 60m일때 case1과 case3형식에서 Fig. 7(a)와 같은 사재좌굴이, case2형식에서는 Fig. 7(b)와 같은 주부재 국부좌굴이 발생하였다. 이는 수직재의 존재 여부에 따라 사재가 부담하는 축력이 감소하기 때문으로 판단된다. 버팀보의 전체길이가 90m로 증가하였을때는 case1, case2, cas3 모두 Fig. 7(c)와 같은 전체좌굴이 최초 발생하였다.

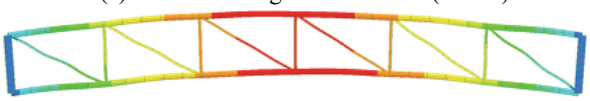
Fig. 8에서 사재와 수직재가 Hinge로 연결된 버팀보에 좌굴을 발생시키는 좌굴임계하중을 비교하였다. Fig. 8(a)는 사재에 좌굴을 발생시키는 조립기둥의 전체축력이다. Hinge 연결에서 강관과 PHC pile의 좌굴임계하중의 차이는 case1에서는 약 10%정도 강관이 크게 나타났지만 case2, case3에서는 1%이내로 유사하였다. 주부재에 국부적인 좌굴을 발생시키는 좌굴임계하중은 case1, case2, case3의 모든 버팀보의 조립형태에서 강관이 PHC pile보다 약 35% 크게 나타났다. 이는 강관의 휨강성이 PHC pile의 휨강성보다 약 35% 크기 때문이다. 주부재에 전체적인 좌굴을 발생시키기 위한 압축력은 길이가 30m일때는 강관이 PHC pile보다 약 8% 크고, 60m에서는 약 12% 크고, 90m에서는 약 16% 크게 계산되었다.

Fig. 9에서 버팀보의 연결형식이 Rigid 연결인 경우 버팀보에 좌굴을 발생시키는 좌굴임계하중을 주부재가 강관, PHC pile 일 때를 비교하였다.



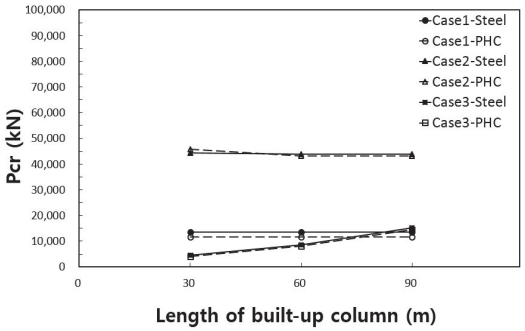
(a) Buckling of diagonal member (case 1)

(b) Local buckling of main strut (case 2)

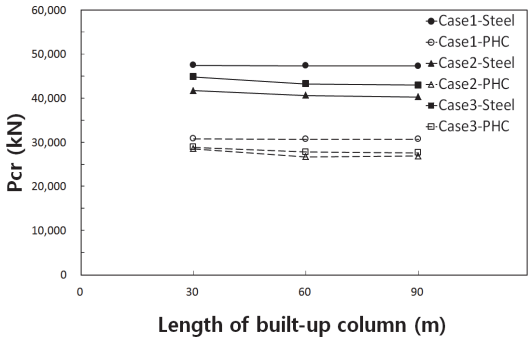


(c) Global buckling of main strut (case 3)

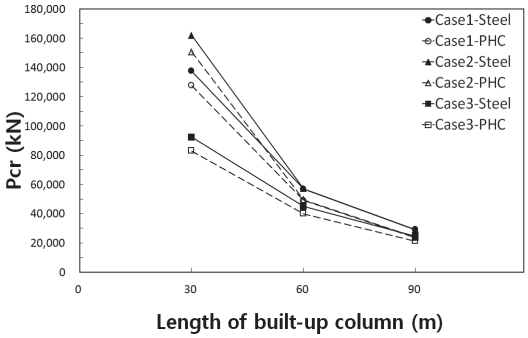
Fig. 7. Buckling mode of built-up columns



(a) Buckling of DM

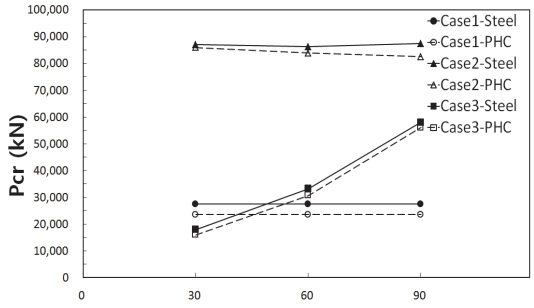


(b) Local buckling of MS

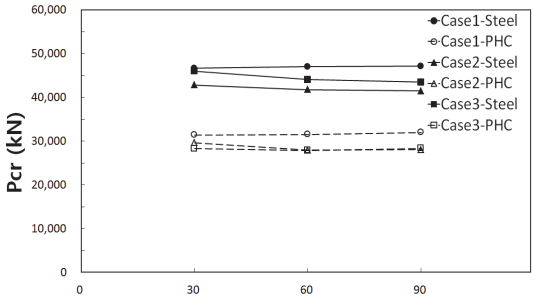


(c) Global buckling of MS

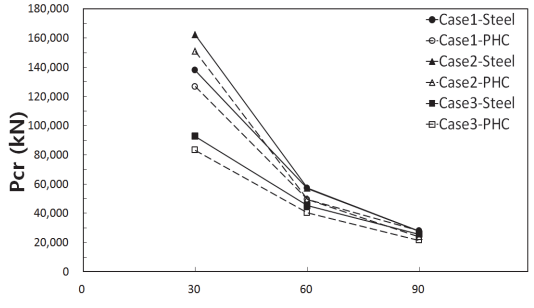
Fig. 8. Buckling load curve of hinge model



(a) Buckling of DM



(b) Local buckling of MS



(c) Global buckling of MS

Fig. 9. Buckling load curve of rigid model

Fig. 9(a)에서 사재에 좌굴을 발생시키는 버팀보의 좌굴임계하중의 차이는 강관이 PHC pile보다 case1에서는 약 14% 크게, case2, case3에서는 약 5% 크게 나타났다. 주부재에 전체적인 좌굴을 발생시키는 좌굴임계하중은 Fig. 9(c)와 같이 해석되었다. 버팀보의 전체길이가 30m, 60m일 때는 강관이 약 10% 크고, 90m일때는 약 15% 강관이 크게 해석되어 전체좌굴모드인 경우 Hinge모델과 Rigid모델의 좌굴거동은 유사함을 확인하였다. 한편 Fig. 8(c)와 Fig. 9(c)에서 버팀보의 전체좌굴모드에 대한 압축력의 크기는 버팀보의 길이 증가와 함께 급격히 감소한다.

그러나 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)에서 사재좌굴모드에 대한 버팀보의 전체축력은 case1과 case2의 버팀보 형식에서는 일정하지만 case3 버팀보 형식에서는 버팀보의 길이 증가와 함께 증가하고 있다. case1과 case2 형식에서와 같이 사재가 대칭으로 배열되면 압축력으로 인해 버팀보에 휨이 발생하지 않지만, case3에서처럼 단일사재가 배치될때 버팀보에 압축력이 재하되면 조립기둥 길이방향으로 이중곡률의 휨변형이 발생하여 식 (2)에서 사재에 발생하는 축력(p)이 감소하므로 사재좌굴을 유발하는 버팀보 좌굴하중 P_{cr}은 증가한다. 이러한 거동은 버팀보의 길이가 증가할수록 이중곡률형태의 주부재 전체적인 휨변형량이 증가하여 더욱 뚜렷하게 나타난다. 유한요소해석을 통한 좌굴해석 결과와 이론해를 비교하여 Table 2과 3에 나타내었다. 주부재가 전체적으로 좌굴이 발생하였을 때는 30m에서는 이론해와 유한요소해가 최대 16%까지 오차가 발생하지만 90m로 길이가 증가함에따라 이론해와 유한요소해의 차이는 약 3% 이내로 감소하였다.

Table 2. Buckling loads of built-up column used STKT590 steel pipe [kN]

Length of main strut	Type of built-up column	Buckling of DM				Local buckling of MS			Global buckling of MS		
		Hinge		Rigid		Hinge	Rigid	Theory	Hinge	Rigid	Theory
		FEM	Theory	FEM	Theory	FEM	FEM		FEM	FEM	
30m	case1	13,538	13,440	27,390	27,419	47,520	46,647	46,735	137,497	137,703	115,650
	case2	44,243	44,439	87,005	90,703	41,771	42,791	46,735	161,904	162,100	157,097
	case3	4,522	4,562	17,874	18,060	44,910	45,960	46,735	92,312	92,469	88,594
60m	case1	13,538	13,440	27,390	27,419	47,392	46,990	46,735	56,937	56,927	50,453
	case2	43,753	44,439	86,161	90,703	40,653	41,742	46,735	57,114	57,114	57,006
	case3	8,456	8,682	33,177	33,982	43,301	44,067	46,735	44,979	45,038	43,674
90m	case1	13,538	13,440	27,390	27,419	47,353	47,098	46,735	29,067	27,684	26,006
	case2	43,753	44,439	87,407	90,703	40,319	41,437	46,735	29,155	27,684	27,654
	case3	15,206	15,431	58,007	64,197	42,987	43,439	46,735	24,417	25,447	24,339

Table 3. Buckling loads of built-up column used PHC pile [kN]

Length of main strut	Type of built-up column	Buckling of DM				Local buckling of MS			Global buckling of MS		
		Hinge		Rigid		Hinge	Rigid	Theory	Hinge	Rigid	Theory
		FEM	Theory	FEM	Theory	FEM	FEM		FEM	FEM	
30m	case1	11,654	11,792	23,485	23,132	30,872	31,382	29,705	127,599	126,598	107,331
	case2	45,734	44,439	85,916	88,977	28,557	29,626	29,705	150,701	150,799	142,117
	case3	4,061	4,130	15,931	16,510	28,910	28,292	29,705	82,924	83,012	83,630
60m	case1	11,654	11,792	23,485	23,132	30,774	31,480	29,705	49,128	49,295	44,439
	case2	43,144	44,439	83,846	82,620	26,771	27,890	29,705	49,501	49,501	49,452
	case3	8,044	8,025	30,617	33,982	27,841	27,831	29,705	40,044	40,123	39,770
90m	case1	11,654	11,792	23,485	23,603	30,745	31,961	29,705	23,652	27,772	22,485
	case2	43,144	43,596	82,512	82,620	26,909	28,037	29,705	23,740	23,740	23,691
	case3	14,470	16,049	56,064	64,197	7,664	28,321	29,705	21,268	21,288	21,219

4. 조립기둥의 설계

4.1 고강도 강관의 설계

STKT590 고강도 강관 지하굴착용 버팀보 설계가이드 및 공사 시방서[14]에 국부좌굴을 고려하지 않은 허용 압축응력이 제시되어있다. 조립기둥의 형식에 따라 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 세장비를 식 (11)로 산정하고 설계가이드에 제시된 허용축방향 압축응력을 적용하여 각각의 좌굴모드에 따른 설계하중을 도출하였다.

$$\lambda = \pi \times \sqrt{\frac{EA}{P_{cr}}} \tag{11}$$

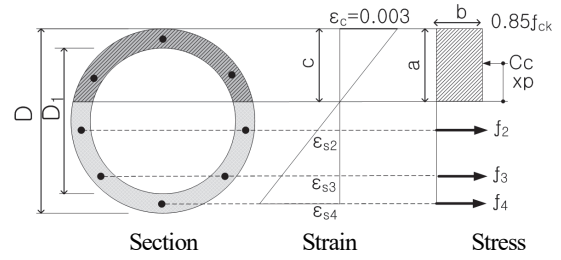
식 (11)에서 EA는 사재좌굴 또는 주부재의 좌굴모드에 대응되는 사재 및 주부재의 축강성이다.

4.2 PHC pile의 설계

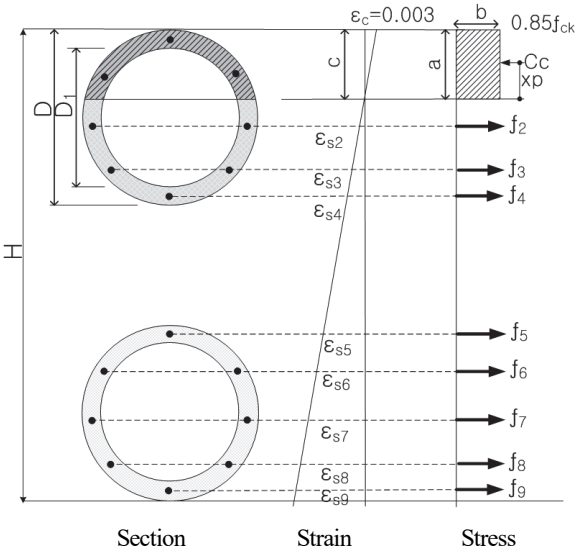
PHC pile은 KS규격인 KSF 4306에 제시된 표준규격을 사용하였다. 제원은 외경 406mm, 두께 65mm, 콘크리트압축강도 78.5MPa이다. PHC pile에 사용된 PC강봉은 일정한 간격으로 원형배근이 되어있다. PHC pile의 P-M상관도 작성을 위한 부분원형 단면의 기하적 특성은 Hsiao의 연구논문을[15] 참조하였다.

PHC pile이 주부재로 사용된 조립기둥의 설계를 위하여 단일 기둥과 조립기둥의 축력-휨모멘트 상관도가 요구된다. Fig. 10(a)에 단일 PHC pile의 휨거동을 나타내었고, Fig. 10(b)에 두 개의 PHC pile이 적용된 조립기둥 단면의 휨거동을 도시하였다.

콘크리트구조기준(2012)의 6.5.6에 나타난 횡구속 압축부재는 계수축력 P_u와 부재의 곡률 영향을 고려하여 구한 확대계수휨모멘트 M_c에 대하여 설계하여야 한다. 흙막이 버팀



(a) Single PHC pile



(b) Built-up PHC pile

Fig. 10. Flexural behavior of PHC Pile

보의 경우 단부모멘트는 토압에 의한 축력과 최소편심($e_{\min}=15+0.01h$)의 곱으로 나타낼 수 있다.

즉 모멘트 확대계수를 고려한 설계모멘트는 식 (12)와 같다.

$$M_u = \frac{1}{1-\dfrac{P_u}{0.75P_{cr}}} P_u(15+0.03h) \tag{12}$$

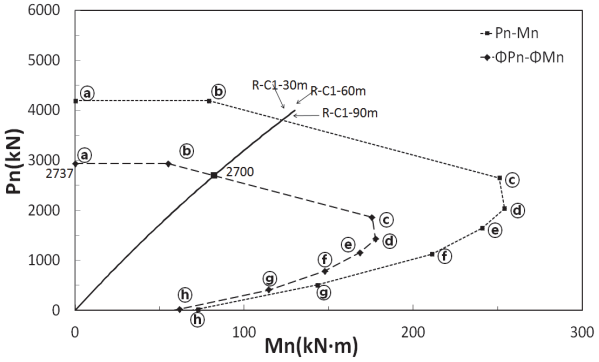
식 (12)에서 주부재에 전체적인 좌굴을 발생시키는 좌굴하중 P_{cr}은 Fig. 2와 같은 조립기둥의 형식에 따라 case1은 식 (9), case2는 식 (10), case3은 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 또한 h는 주부재의 국부적인 좌굴이 발생할 경우 Fig. 10(a)와 같이 PHC의 직경(D)이고, 주부재의 전체적인 좌굴이 발생할 때는 Fig. 10(b)에서 조립기둥 주부재 사이의 간격(H)이다. 여기서, H는 상부의 PHC pile의 상단의 표면부터 하부 PHC pile의 하단의 표면까지의 거리이다.

본 논문에서는 Fig. 10과 같이 변형 전·후 단면은 평면을 유지한다는 보이론의 기본가정을 도입하여 P-M상관도를 도출하였다.

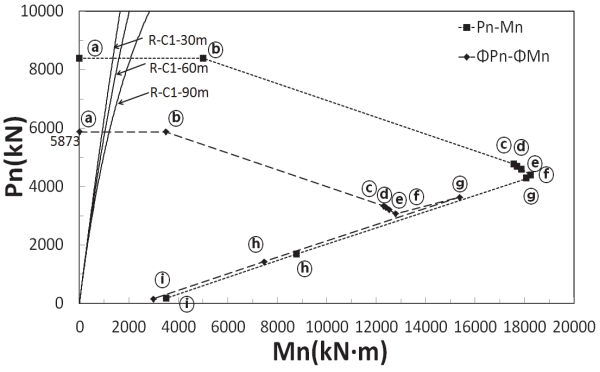
4.3 PHC 조립기둥의 P-M 상관도

Fig. 11(a)는 단일 PHC pile의 축력-휨모멘트 상관도이고, Fig. 11(b)는 조립 PHC pile의 축력-휨모멘트의 상관도로서, 각각 Fig. 3(b)와 (c)에 나타난 주부재의 국부좌굴 및 전체좌굴에 대한 설계축력 산정시 사용된다. Fig. 11(a)와 (b)의 그래프에서 ⓐ점은 부재축방향의 힘의 평형을 이용하여 계산한 최대압축강도 P_o, ⓑ는 순수 압축력만 작용하거나 작은 휨모멘트가 작용하는 경우 기둥이 저항할 수 있는 최대 축하중을 제한하고자 현행 구조설계기준(2012)에서 적용하고 있는 점이다. ⓒ는 인장연단에 가장 가까운 철근의 응력을 0 으로 가정하여 계산한 철근의 변형률로 축력-휨모멘트를 계산한 점을 나타낸다. 이와 같은 방법으로 ⓓ, ⓔ점은 각각 최외단의 철근의 응력이 항복응력의 25%, 50%일 때를 계산하였고, ⓕ는 인장연단에 가장 가까운 철근의 변형률이 항복변형률에 도달하는 것과 동시에 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003에 도달하는 점이다. Fig. 11(a)에서의 ⓖ, ⓗ는 각각 인장연단에 가장 가까운 철근의 변형률이 항복변형률의 2배, 4배와 같을 때 축력-휨모멘트의 값을 계산하였고 Fig. 11(b)의 ⓖ, ⓗ, ⓘ은 각각 최 외단 철근의 변형률이 항복변형률의 4배, 10배, 30배와 같을 때의 축력-휨모멘트 값을 계산하였다. Fig. 11(b)에서 ⓒ~ⓖ는 조립기둥에서 주부재 사이간격이(H=4,000mm) PHC파일의 직경에 비해 크기 때문에 최외단 철근의 변형률이 항복변형률을 크게 초과하여도 중립축의 위치는 거의 동일한 결과로 압축강도의 변화가 크지 않음을 나타낸다.

Fig. 11(a)와 (b)에서 점선은 단일 PHC pile과 조립 PHC pile기둥의 축력-휨모멘트의 상관곡선이고, 파선은 콘크리트 구조설계기준(2012)에 따른 강도감도계수를 적용한 곡선이다. 조립기둥의 rigid연결, case1에 대하여 버팀보의 길이가 30m, 60m, 90m 인 경우 주부재 국부좌굴이 발생하였을 때에 대해 식 (12)로 계산한 축력-휨모멘트 상관도를 Fig. 11(a) 에 실선으로 작성하였고, 주부재에 전체적인 좌굴이 발생하였을때는 Fig. 11(b)에 실선으로 나타내었다. 각각의 좌굴에 대한 최대설계축력은 Fig. 11(a)와 (b)에서 강도감도계수가 적용된 파선의 P-M상관곡선과, 각 case에 대응되는 식 (12)의 축력-휨모멘트 관계식을 표현한 실선이 교차하는 점이 된다.



(a) Single PHC column



(b) Built-up PHC column

Fig. 11. P-M diagram of single and built-up PHC pile

5. 설계 결과

3장의 유한요소 해석결과를 활용하여 설계결과를 도출하였다. 고강도 강관을 사용한 버팀보는 4.1의 고강도 강관의 설계기준을 이용하여 수행하였으며 4.2의 PHC pile의 설계를 활용하여 PHC pile을 사용한 버팀보의 설계를 하였다.

5.1 STKT590 강관을 사용한 버팀보

Fig. 12는 STKT590 강관을 사용한 흙막이 버팀보의 조립기둥에 대한 설계결과이다. Fig. 12(a)는 사재에 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 허용설계축력을 도로교 설계기준(2010)에 의하여 계산하였다. Fig. 2의 case 1과 case 2 형태의 버팀보는 rigid, hinge 연결 및 조립기둥의 길이의 변화에 따른 설계축력 변화가 없다. 단부사재가 부담하는 축력의 차이 때문에 수직재가 없는 case 2가 case 1보다 4배 크게 나타났다. 사재가 하나인 case 3에서는 Fig. 8(a)의 좌굴거동에 나타난 바와 같이 조립기둥의 길이가 증가함에 따라 단부사재가 부담하는 축력이 감소하여 조립기둥의 길이가 증가함에 따라 설계축력이 증가하였다.

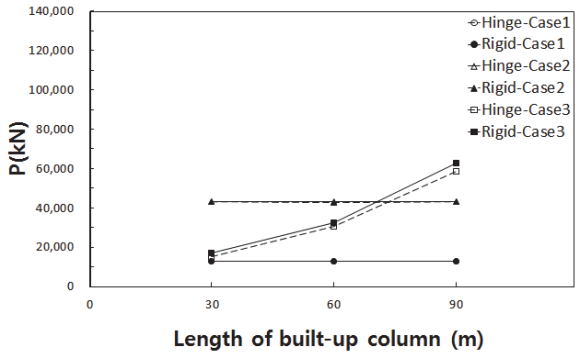
Fig. 12(b)는 강관에 국부적인 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력을 나타내었다. 주부재에 국부적인 좌굴을 발생시키는 하중은 주부재의 길이, 연결형식, 조립기둥형식에 대하여 거의 동일하므로 설계축력도 모든 경우에 대해 약 11,000 kN으로 일정하다.

Fig. 12(c)는 조립기둥에 전체적으로 좌굴을 발생시키는 하중에 대하여 설계축력을 계산하였고, 길이가 30m일때는 약 11,000kN 으로 연결형식, 조립기둥형식에 따른 설계축력은 큰 차이가 없지만, 조립기둥의 전체길이가 증가함에 따라 설계축력은 60m에서 약 10,000kN, 90m 에서는 9,000 kN으로 길이증가에 따라 거의 선형적으로 설계축력이 감소하였다.

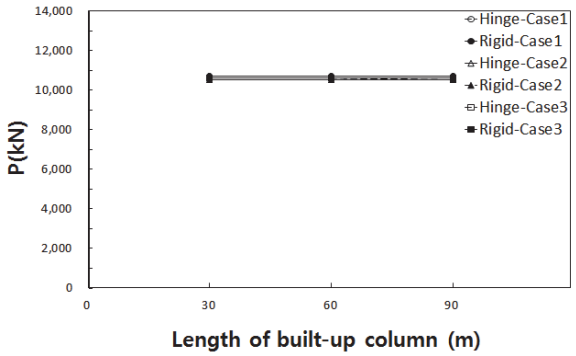
5.2 PHC Pile을 사용한 버팀보

주부재를 PHC pile을 사용한 흙막이 버팀보의 설계축력을 계산하였고 이 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 사재(SM490)에 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력은 도로교 설계기준(2010)의 표 3.3.2에 의하여 계산하였다. Fig. 2의 case 1과 case 2형태는 연결형식인 rigid, hinge 연결 및 조립기둥의 길이와 관계없이 설계하중의 변화가 작지만 단부사재가 부담하는 축력의 차이 때문에 수직재가 없는 case 2가 case 1보다 4배 크게 나타났다. 고강도 강관을 사용한 조립기둥과 마찬가지로 case 3에서는 전체길이가 증가함에 따라 단부사재가 부담하는 축력이 급격히 감소하여 설계축력이 증가하였다.

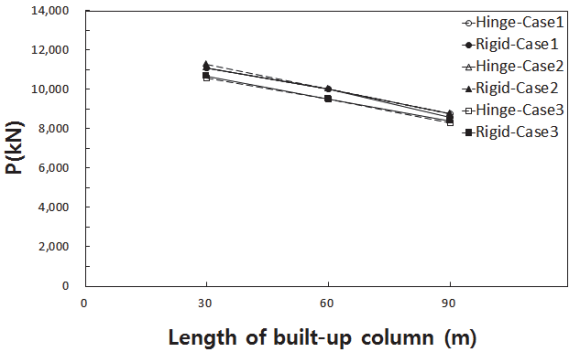
Fig. 13(b)에서 조립기둥의 주부재에 국부적인 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력은 Fig. 11(a)의 단일 단면에 대한 PHC pile의 축력–휨모멘트 상관도를 사용하여 도출하였다. Fig. 11(a)의 실선과 파선이 만나는 점이 좌굴파괴의 한계점이며 국부적인 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 PHC



(a) Buckling of DM



(b) Local buckling of MS

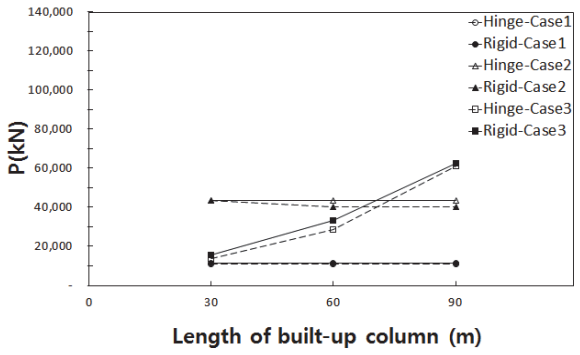


(c) Global buckling of MS

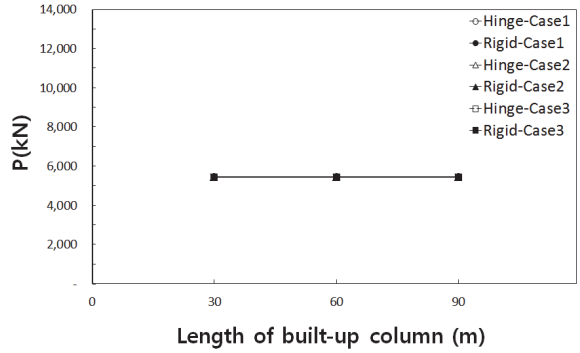
Fig. 12. Design load of built-up columns using STKT590 pipe

pile의 설계축력은 5400kN으로 조립기둥형식, 길이 및 부재 연결형식에 대해서 동일하다.

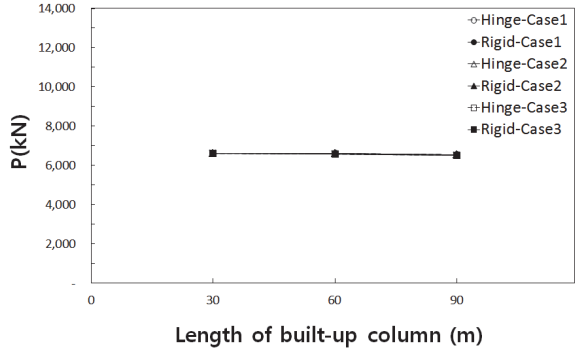
Fig. 13(c)에서 주부재가 전체적인 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력을 식 (12)의 P-M상관도를 이용하여 산정하였다. 조립기둥의 길이가 30m에서 60m, 90m로 증가함에 따라 확대모멘트의 값은 20%～40%의 증가를 보이지만, Fig. 11(b)의 P-M상관도에서 설계축력이 일정한 구간 ⓐ-ⓑ에 교차하므로 설계축력은 약 6,600kN으로 일정함을 확인하였다.



(a) Buckling of DM



(b) Local buckling of MS

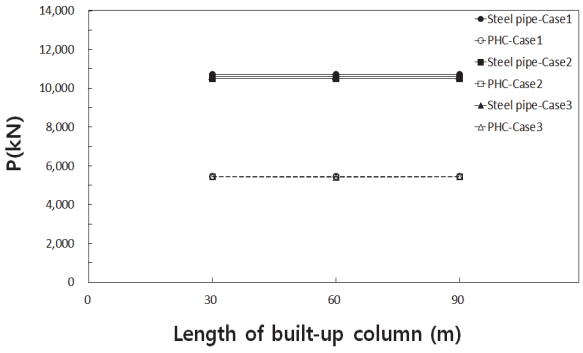


(c) Global buckling of MS

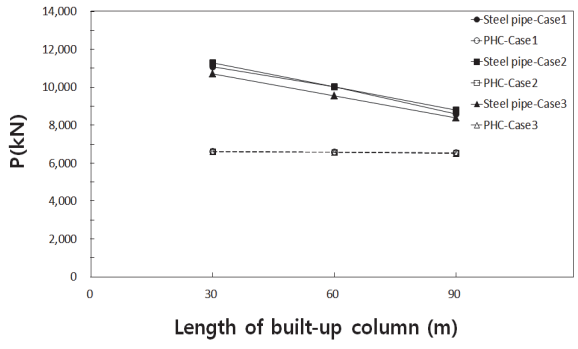
Fig. 13. Design load of built-up columns using PHC pile

5.3 고강도 강관과 PHC pile의 설계축력 비교

고강도 강관을 주부재로 사용한 조립기둥과 PHC pile이 주부재로 사용된 조립기둥의 설계축력을 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 5.1과 5.2의 설계결과에서 Rigid모델과 Hinge모델의 설계축력의 오차가 크지 않으므로 Rigid모델에 대해서 주부재의 재질에 따른 설계축력의 차이를 비교하였다. Fig. 14(a)는 주부재에 국부적인 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력을 비교 하였다. 주부재가 고강도 강관일 때 11,000kN으로 PHC pile로 조립되었을 때 보다 약 2배 큰 결과를 나타냈다. Fig. 14(b)는 조립기둥에 전체적으로 좌굴을 발생시키는 하중에 대한 설계축력을 계산하였다. 조립기둥의 전체길이가 30m에서 주부재가 강관일때는 약 11,000kN이지만 PHC pile에서는 약 6,600kN으로 약 1.7배 큰 결과가 도출되었지만, 조립기둥의 전체길이가 증가함에 따라 90m에서는 강관에서 약 8,500kN, PHC pile에서는 약 6,500kN으로 약 1.3배의 차이로 길이의 증가에 따라 설계축력이 감소함을 나타냈다.



(a) Local buckling of MS



(b) Global buckling of MS

Fig 14. Design load of built-up columns

6. 결 론

본 논문에서는 STKT590 고강도 강관과 PHC pile을 활용한 조립기둥형식을 갖는 흙막이 버팀보의 좌굴거동을 분석하였고, 이를 이용하여 버팀보의 길이, 연결형식 및 조립형태에 따른 흙막이 버팀보의 설계축력을 산정하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 논문에서 제시한 흙막이 버팀보 시스템의 좌굴거동에 대하여 전단변형효과를 고려한 이론식은 유한요소해석 결과와 잘 일치하며 버팀보 설계에 효과적으로 사용할 수 있다고 판단된다. 특히, 조립기둥의 길이가 증가할수록 주부재 전체좌굴거동에 대한 이론해는 유한요소해석 결과와 유사함을 확인하였다.

(2) 주부재가 고강도 강관으로 조립된 버팀보에서는 주부재 전체좌굴에 대한 설계축력이 조립기둥 전체의 압축강도를 결정하며 부재길이가 30m, 60m, 90m일 때 약 11,000kN～9,000kN이고, 연결형식 및 조립기둥형태에 따른 설계축력의 차이는 최대 5% 이내의 값을 가지는 것으로 산정되었다.

(3) PHC파일을 주부재로 활용한 버팀보는 단일단면 및 조립단면의 P-M상관도로부터 설계축력을 산정할 수 있으며, 장주효과를 고려한 확대모멘트 값이 크지 않아, 버팀보의 길이, 연결형식, 조립기둥 형태에 큰 영향을 받지 않고 수직재 사이에서 발생하는 주부재의 국부좌굴이 흙막이 버팀보의 설계축력을 결정하는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 충북대학교 학술연구비 지원사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Timoshenko, S., and Gere, J.M. (1961) *Theory of Elasticity Stability* (2nd Ed.), McGraw-Hill, USA, p.138.

[2] Galambos, T.V. (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (5th Ed.), John Wiley & Sons, USA, pp.87-104.

[3] 유충식, 나승민, 이종구, 장동욱(2010) 강관버팀보 흙막이 시스템의 거동 특성에 관한 수치해석적 연구, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제26권, 제6호, pp.45-56.
Yoo, C.-S., Na, S.-M., Lee, J.-G., and Jang, D.-W. (2010) Numerical Investigation on the Behavior of Braced Excavation Supported by Steel Pipe Struts, *Journal of Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol.26. No.6, pp.45-56 (in Korean).

[4] 김진용, 김성보(2011) 강재 조립 기둥의 좌굴 거동에 대한 매개변수 해석, 대한토목학회논문집 A, 대한토목학회, 제31권, 제2A호, pp.79-87.
Kim, J., and Kim, S.B. (2011) Parameter Study of Buckling Behavior of Steel Built-up Colmn, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.31, No.2A, pp.79-87 (in Korean).

[5] 강두원, 권영봉(2009) 원형강관 기둥의 구조적인 거동 및 강도에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.505-514.
Kang, D.W., and Kwon, Y.B. (2009) A Study on the Structural Behavior and the Strength of Circular Hollow Steel (CHS) Section Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.5, pp.505-514 (in Korean).

[6] 김선희, 최영환, 최성모(2012) HSB600 원형강관 기둥의 거동에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.743-751.
Kim, S.H., Choi, Y.H., and Choi, S.M. (2012) Experimental Study on the Behavior of Circular Steel Tube Columns Using HSB600 Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.743-751 (in Korean).

[7] 박창희, 이철호, 한규홍, 김진호, 이승은, 하태휴, 김진원(2013) 고강도 강재보의 비탄성 횡-비틀림좌굴 제어를 위한 횡지지 거리, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제2호, pp.115-130.
Park, C.H., Lee, C.H., Han, K.H., Kim, J.H., Lee, S.E., Ha, T.H., and Kim, J.W. (2013) Laterally Unbraced Length for Preventing Inelastic Later-Torsional Buckling of High-Strength Steel Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.2, pp.115-130 (in Korean).

[8] 김성진, 김성배, 이창남, 목진오, 허건영, 이병락, 김상섭(2007) PHC 파일을 기둥재로 적용하기 위한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 구조계, 대한건축학

회, 제27권, 제1호, pp.127-130.
Kim, S.-J., Kim, S.-B., Lee, C.-N., Mok, J.-O., Heo, K.-Y., Rhee, B.-R., and Kim, S.-S. (2007) Study on the Bond Strength of PHC Pile Band Plate, *Proceedings of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea −Structure & Construction*, AIK, Vol.27, No.1, pp.127-130 (in Korean).

[9] 최원용, 김두겸, 이형교, 송병은, 심낙훈, 박영석(2010) PHC 파일의 수직형 볼트 이음공법에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.46-51.
Choi, W.-Y., Kim, D.-K., Lee, H.-G., Song, B.-E., Shim, N.-H., and Park, Y.-S. (2010) An Experimental Study on Vertical Bolt Joint Method of PHC Piles, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.46-51 (in Korean).

[10] 나승민(2007) 고강도강관버팀보기술매뉴얼, RIST 강구조연구소, p.5.
Na, S.M. (2007) *Technical Manual of High-Strength Steel Pipe Strut*, Steel Structure Research Division of Research Institute of Industrial Science & Technology, Korea, p.5 (in Korean).

[11] 김성보, 한만엽, 김문영, 정경환(2006) 혁신적인 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS)을 적용한 굴착면의 해석 및 설계, 대한토목학회논문집 A, 대한토목학회, 제26권, 제1A호, pp.163-171.
Kim, S.-B., Han, M.-Y., Kim, M.-Y., and Jung, K.-H. (2006) Design of Building Excavation Plane in Innovative Prestressed Scaffolding (IPS) System, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.26, No. 1A, pp.163-171 (in Korean).

[12] 진용(2007) 지하굴착용 버팀보에 사용하는 원형강관의 구조특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 명지대학교.
Jin, Y. (2007) *An Experimental Study on the Behavior of Steel Pipe Strut Used in Underground Excavation*, Master's Thesis, Myongji University, Korea (in Korean).

[13] 마호성, 조광일(2013) 매개변수해석을 통한 원형 강관의 전단좌굴응력 상세분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp.579-585.
Mha, H.-S., and Cho, K.I. (2013) Analysis of Shear Buckling Stresses for Steel Pipes by Detailed Parametric Study, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.579-585 (in Korean).

[14] 대한토목학회(2007) STKT590 강관 지하굴착용 버팀보 설계가이드 및 공사 시방서, pp.3-9.
Korean Society of Civil Engineers (2007) *Design Guide and Specifications of Strut for Underground Excavation Construction Using STKT590 Steel Pipes*, KSCE, Korea, pp.3-9 (in Korean).

[15] Hsiao, J.K. (2012) Bending-Axis Effects on Load-Moment (P-M) Interaction Diagrams for Circular Concrete Columns Using a Limited Number of Longitudinal Reinforcing Bars, *Electronic Journal of Structural Engineering*, EJSE International, Vol.12, No.1, pp.10-16.

요 약 : 본 연구에서는 고강도 강관과 PHC pile을 활용한 흙막이 버팀보의 좌굴거동과 설계를 수행하였다. 조립기둥의 형식 세가지와, 연결방식, 버팀보의 전체길이(30m, 60m, 90m)에 따라 다양한 버팀보 시스템에 대한 좌굴해석을 하였고, 주부재의 국부좌굴 및 전체좌굴, 사재좌굴에 대해 유한요소해석을 통해 계산된 좌굴하중을 엄밀해와 비교분석하였다. 고강도강관 설계가이드와 PHC pile로 조립된 기둥의 P-M상관도를 활용하여 조립기둥의 설계를 수행하였다.

핵심용어 : 설계, 좌굴해석, 흙막이 버팀보, 강관, PHC파일