비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재의 좌굴 거동에 관한 실험 연구 I - 연결재 간격의 영향 -

An Experimental study of Buckling Behavior in Built-up Compression Member with Unsymmetric Connectors I - Effect of Distance of Connecting Members -

강상훈* · 한만엽** · 조병두***

Kang, Sanghoon · Han, Manyop · Cho, Byeongdu

Abstract

Structural behavior of built-up compression members with unsymmetric connectors under buckling status has been studied through these experiments. When the distance between adjacent H-300 beams of built-up compression member is 2 m in length, and the H-300 beams are lengthened up to 30 m in length with three-10 m-H-beams by bolts and double arrayed, three specimen having each connector interval 4 m, 5 m, 6 m are experimented for evaluating buckling loads. The buckling loads from the experiments are compared with buckling loads of structural analysis using FEM and buckling loads of Timoshenko Eq. loads in order to figure out how the connectors' interval affects on longitudinal and lateral displacements, also strain of the built-up compression members as well. The result shows that the buckling loads tend to sharply decrease non-linearly according to connectors' interval increases. As well as that, the differences between experimental buckling loads and theoretical buckling loads and between experimental buckling loads and structural analyses buckling loads also have a tendency to be increased as the connector interval increases.

Keywords : built-up compression member, distance of connection members, buckling load, buckling behavior, experimental study

요 지

본 연구에서는 비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재의 연결재 간격에 따른 좌굴 거동을 알아보기 위한 실험 실험을 실시하였다. 압축부재인 H-300 형강 10 m 부재 3개를 볼트 연결하여 총 길이 30 m가 되도록 2 m 간격으로 2열 배치한 후 연결재 간격이 4 m, 5 m, 6 m인 경우에 대하여 압축 실험을 실시하였다. 본 논문에서는 연결재 간격에 따른 실험 좌굴 하중을 평가하고 이를 유한요소해석 좌굴하중 및 Timoshenko 식에 의한 좌굴하중과 비교·분석 하였으며, 연결재 간격의 증가에 따른 조립식 압축부재의 좌굴 거동으로 인한 중방향 변위, 횡방향 변위, 변형률 등을 분석하였다. 실험 결과 연결재 간격이 증가함에 따라 조립식 압축부재의 좌굴 하중은 비선형적으로 급격히 감소함을 알 수 있었다. 그리고 연결재 간격이 증가함에 따라 실험 좌굴 하중과 이론 좌굴 하중의 차이 및 실험 좌굴 하중과 유한요소해석 결과의 차이도 증가되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 조립식 압축부재, 연결재 간격, 좌굴 하중, 좌굴 거동, 실험 연구

1. 서 론

압축부재는 크게 단일 압축부재와 조립식 압축부재로 나뉘는데 단일 압축부재로는 H 형강이나 강관과 같은 압연형강이 많이 사용된다. 그러나 표준 압연형강의 크기와 형태는 경제성과 제조시설의 한계성 등으로 일정한 규격 이하로 제

한돼 있어 압연형강의 단일재로 설계축력을 지지하기 어려운 경우에는 강재를 조립하여 압축부재로 사용하게 된다. 조립식 압축부재는 가공비용을 줄이기 위하여 H 형강, C 형강, I 형강 등의 압연형강을 따판, 깔판 등으로 연결한 조립식 압축부재로 교량 및 건축물의 기둥, 철탑, 가설 교량의 교각, 지하철 및 지하차도 그리고 건축 터파기 현장 복공의

*정회원 · 교신저자 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정 (E-mail : kkang007@hanmail.net)

**정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : myhan@ajou.ac.kr)

***아주대학교 건설교통공학과 석사과정 (E-mail : 3ddembang@hanmail.net)

기둥, 흠막이 가시설의 압축부재 등 큰 압축력을 받는 부재로 건설 분야에 널리 사용되어진다.

조립식 압축부재의 파괴 거동은 주로 좌굴에 의해 지배된다. 조립식 압축부재의 좌굴에 대한 연구는 Engesser(1891)에 의해 전단변형을 고려한 해석연구가 소개된 이후 Bleich(1952)가 에너지 개념을 도입하여 조립식 압축부재를 해석하였으며, Timoshenko and Gere(1961)는 여러 종류의 조립식 압축부재에 대해 전단변형을 고려한 좌굴하중 식을 제시하였다. 그 후 Aslan와 Goel(1991)은 Bleich가 제시한 식을 수정하여 일반화된 식을 제시하였다. 또한 Temple와 Elmahdi(1993)는 조립식 압축부재의 해석을 실험과 병행하여 조립식 압축부재의 강도를 AISC-LRFD 시방서와 비교 분석하였다. 국내에서는 최성준 등(1997)과 신영재 등(2001), 김성보 등(2005)이 전단의 영향을 고려한 조립식 압축부재의 좌굴에 대한 연구가 발표되었다.

이처럼 조립식 압축부재에 대한 좌굴연구는 대부분 이론 및 해석에 대한 연구가 대부분이고 실험적 연구는 미비한 상태이다. 또한 연결재가 비대칭인 경우에 대한 연구는 김진용 등(2011)이 해석에 관한 연구뿐이며 실험에 대한 연구는 찾아볼 수 없다. 그래서 비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재의 좌굴 거동에 대한 실험적 연구 필요성이 제기되었다. 따라서 본 논문에서는 비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재의 실험 대형 실험을 통하여 연결재 간격에 따른 좌굴 거동에 대한 영향을 평가하고, 실험 좌굴하중과 유한요소해석 및 Timoshenko and Gere(1961)가 제시한 이론 좌굴하중을 비교하였다.

2. 조립식 압축부재

2.1 개요

조립식 압축 부재는 압축을 받는 주부재와 주부재를 서로 연결하여 주는 연결재로 구성되어 있다. Fig. 1은 조립식 압축부재의 연결재 형태에 따른 대표적인 종류를 제시한 것이다. (a)는 띠판만 있는 형태로써 압축부재와 수직이 되도록 일정한 간격으로 연결한 연결재만 있는 형태이고, (b)는 압축부재에 사로 연결한 연결재만 있는 형태이며, (c)는 압축부재에 사로 연결한 연결재가 이중으로 있는 형태이다.

Fig. 1 Types of built-up compression member

Fig. 2 Built-up compression member with unsymmetric connectors

(d)는 (a)와 (b)를 결합한 형태이며, (e)는 (a)와 (c)를 결합한 형태이다. 구조적으로는 (a)에서 (e)로 갈수록 안정적인 형태이나 강재량이 증가되고 띠판의 용접 및 연결재의 볼트 연결 등 작업량이 많아 경제성은 낮아진다. 영구구조물에서는 구조적인 안정이 최우선이기 때문에 (e)와 (d)의 형태를 취한다. 그러나 가설 구조물은 설치했다 해체하는 임시구조물이고 설치 기간도 짧기 때문에 안전율을 영구구조물 보다 작게 하는 것이 일반적이다. 그래서 (e)와 (d)의 형태 보다 덜 안정적이지만 강재량이 적고 작업량이 적은 (a), (b)형태를 취하고 있다. 또한 영구구조물의 경우는 연결재를 압축부재의 중심에 설치하거나 대칭이 되도록 설치하여 편심이 생기지 않도록 하지만 가설 구조물의 경우는 영구구조물에 비해 안전율이 낮고 설치 해체를 용이하게 하기위해서 연결재를 압축부재의 한쪽 플랜지에만 설치하는 경우가 대부분이다.

Fig. 2는 흠막이 가설 구조물에 사용되는 조립식 압축 부재를 나타낸 것이다. 흠막이 가설 구조물의 조립식 압축부재는 일반적으로 좌굴 방지를 위해 중간 파일을 일정한 간격으로 설치한 후 반침보를 설치하고 그 위에 압축부재를 설치한다. 그래서 상·하부 플랜지가 비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재 구조가 된다.

2.2 좌굴 강도

조립식 압축 부재의 좌굴과 관련하여 Timoshenko and Gere(1961)는 띠판을 갖는 기둥(column with batten plates)에 대하여 작용하중에 따른 기둥의 전단변형을 고려한 좌굴하중 식을 제시하였다.

Fig. 3과 같이 띠판(batten)만 있는 조립식 압축부재의 경우에는 전단력 Q 에 의한 횡변위를 얻기 위해, m - n 단면과 $m1$ - $n1$ 단면 사이의 압축부재 요소의 변형을 고려하였다.

형강의 휨 곡선이 이 점들에서 변곡점을 가진다고 가정하면, 요소의 휨은 Fig. 3의 (b)와 같이 요소는 휨 것이다. 그

Fig. 3 Built-up compression member with batten plates

래서 주부재에 작용하는 전단력 Q에 의한 띠판의 휨 변형 δ_1 과 주부재인 $\angle$ 형강의 휨 변형 δ_2 를 고려한 좌굴하중 식 (1)을 제시하였다. 그리고 식 (1)에 띠판에 작용하는 전단력 Q를 고려하여 식 (2)를 제시하였다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{ab}{12EI_b} + \frac{a^2}{24EI_c} \right)} \quad (1)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left(\frac{ab}{12EI_b} + \frac{a^2}{24EI_c} + \frac{na}{bA_b G} \right)} \quad (2)$$

편심하중을 받는 기둥 또는 중심축하중과 양단에서 모멘트를 함께 받는 기둥의 최대압축응력으로 식 (3)을 사용한다. 그래서 조립식 압축부재의 편심축하중이 작용하는 압축부재의 합성응력은 압축응력과 휨응력을 동시에 고려한 식 (4)를 제시하였다.

식 (4)에서 M_1 은 편심에 따른 1차 모멘트이고 M_2 는 횡변위에 따른 2차모멘트이다. 따라서 e 는 편심거리이고 δ 는 하중에 따른 횡변위이다. 또한, 조립식 압축부재는 종방향으로 전 단면에 걸쳐 합성이 되지 않은 불완전합성 구조체임으로 합성단면 2차 모멘트 감소계수 α 를 사용하였다.

식 (4)를 P에 대하여 정리하면 식 (5)와 같다.

$$f_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$f = \frac{P}{A} + \frac{M_1 y}{\alpha I} + \frac{M_2 y}{\alpha I} = \frac{P}{A} + \frac{Pe y}{\alpha I} + \frac{P \delta y}{\alpha I} \quad (4)$$

$$P = f \left(\frac{1}{A} + \frac{ey}{\alpha I} + \frac{\delta y}{\alpha I} \right) \quad (5)$$

3. 유한요소해석

비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재가 중심축하중을 받

Fig. 4 Modeling

을 때의 좌굴하중을 평가하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 좌굴해석을 수행한 후 고유치 값을 도출하여 좌굴하중을 산출하였다.

3.1 모델링

전체적으로 좌표계는 Fig. 4의 (a)와 같이 압축부재 종방향을 X축, 횡방향을 Y축, 나머지를 Z축으로 설정하여 X-Y 평면 내에 조립식 압축부재를 모델링하였고 SI단위계를 사용하였으며 X-Y 평면, X-Z 평면 Y-Z 평면의 거동을 허용하기 위하여 3차원 해석을 수행하였다.

Fig. 4의 (a)는 3D 모델 형상이고 (b)는 Y-Z 평면상의 모델링 형상이다. 압축부재와 연결재는 Fig. 4의 (b)와 같이 두 부재의 중심이 불일치함으로 Fig. 4(a)의 (11111)와 같이 Rigid Link 기능을 이용하여 강제 연결하였고 전체적으로 상부 플랜지에만 연결재를 갖도록 비대칭으로 모델링하였다.

해석모델의 모든 요소부재는 보요소로 모델링 하였고 부재는 실험체와 동일하게 Table 1과 같이 모델링하였으며 30 m의 압축부재는 1 m 간격으로 분할하여 모델링하였다.

지점조건 또한 실험 조건과 동일하게 6 m 간격으로 받침보를 형성하여 압축부재의 솟음을 구속하기 위해 받침부는 Z축 변위만을 구속하였고 가력부는 종방향(X축) 변위만 발생할 수 있도록 Y축, Z축 변위를 고정 시켰으며 지점부는

Table 1. Element properties of beam model

	Material property	Cross-Section	Element
Compression member	SS400	H 300×300×10/15	Beam
Connection member	SS400	Solid Rectangle 750×12	Beam

Table 2. Boundary conditions of beam model

	D _x	D _y	D _z	R _x	R _y	R _z
End support	Fix	Fix	Fix	Free	Free	Free
Loading support	Free	Fix	Fix	Free	Free	Free
Middle Support	Free	Free	Fix	Free	Free	Free

Fig. 5 Load conditions of beam model

Table 3. Results of buckling analysis

	Analysis result	
	Eigenvalue	Buckling loads(kN)
C4	1.184	4736
C5	0.662	2647
C6	0.465	1859

X, Y, Z축 변위를 모두 고정시켰다. 회전은 전체적으로 허용하였으며 Table 2에 지점조건을 정리하여 표로 제시하였다.

하중 조건은 중심축하중을 받을 수 있도록 총 하중이 4000 kN이 되도록 각 압축부재에 2000 kN 씩 대칭으로 Fig. 5와 같이 재하 하였다.

3.2 해석 결과

각 조건별 실험 좌굴하중 값과 비교하기 위하여 유한요소 해석을 수행하여 고유치 값을 도출하여 좌굴하중을 산출하였다. Table 3은 유한요소해석 결과를 정리한 표이며 여기서 C는 Connecting Distance의 약자이고 뒤의 숫자는 연결재 간격이 4 m, 5 m, 6 m인 실험체를 의미한다.

4. 실험 대형 실험

비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재의 좌굴 거동에 대한 연결재 간격의 영향을 평가하기 위하여 실제 흙막이 가설구조물에 쓰이는 총 길이 30 m인 조립식 압축부재에 대하여 실험을 실시하였다. 실험 조건은 연결재 간격이 4 m, 5 m, 6 m인 경우에 대하여 실험을 실시하였다.

4.1 실험체 설치

실험체는 10 m 압축부재 6개를 2 m 간격으로 2열로 3개씩 받침대 위에 올려놓고 Fig. 6의 (a)와 같이 볼트 4개로 압축부재를 서로 연결하고 (b)와 같이 판형 연결재를 압축부재의 상부 플랜지에만 한쪽 당 볼트 12개로 연결하여 (c)와 같이 비대칭 연결재를 갖는 조립식 압축부재를 형성하였다.

실험체의 지점 조건을 형성하기 위하여 하중 가력부는 Fig. 7의 (a)와 같이 횡(면내)방향 변위 및 솟음(면외 변위)을 구속하기 위하여 콘크리트 바닥에 형강을 고정시킨 후 형강으로 두 형강을 연결하여 솟음(면외 변위)이 발생하지 않도록 고정시켰으며 압축부재와 형강이 맞닿게 하여 횡(면내)변위를 구속하였다.

중간의 압축부재의 받침부는 하중가력에 따른 솟음을 제어

(a) Connection of compression members

(b) Setting of connection members

(c) specimen

Fig. 6 Setting of specimens

(a) Loading parts

(b) Middle parts

(c) End parts

Fig. 7 Details of boundary conditions

하기 위하여 Fig. 7의 (b)와 같이 앵커볼트를 이용하여 콘크리트 바닥에 형강을 고정시킨 후 형강으로 두 형강을 연결하여 솟음(면외 변위)이 발생하지 않도록 고정시켰으며 압축부재와 형강 사이에 공간을 두어 압축부재가 횡(면내)방향으로 변위가 발생할 수 있도록 구속하지 않았다.

지점부는 Fig. 7의 (c)와 같이 종(면내)방향 변위와 횡(면

(a) Cylinders

(b) Electric pumps

Fig. 8 Static loading

내) 변위를 구속하기 위하여 형강을 가력대와 용접하여 구속하였다.

4.2 하중 재하

하중 재하는 Fig. 8의 (a)와 같이 P1에 4000 kN 실린더를 설치하고 P2에 2000 kN 실린더를 설치하여 Fig. 8의 (b)와 같이 전동펌프 2개에 각각 연결하여 25 kN/min의 속도로 하중을 재하하면서 5초 간격으로 계측을 실시하였다.

4.3 계측

Fig. 9의 (a), (b), (c)는 각 실험 조건별 계측기 위치도를 나타낸 것이다.

하중 재하에 따른 조립식 압축부재의 종방향 압축변위를 계측하기 위하여 2개의 LVDT를 설치하였고 부재의 횡방향 수평변위를 계측하기 위하여 LVDT 10개를 설치하였으며 솟음을 계측하기 위하여 중앙부에 2개의 LVDT를 설치하였다.

조립식 압축부재의 압축변형, 휨변형, 전단변형을 계측하기 위하여 변형률게이지를 총 47개를 설치하였다.

압축부재의 길이에 따른 종방향 변형률의 변화를 알아보기 위하여 10 m 압축부재의 복부 끝단에 2개씩 6개, 양쪽 압축부재에 총 12개의 변형률게이지를 부착하였다.

하중 가력에 따른 압축부재와 연결재의 연결 주변의 하중 전달이 어떻게 이루어지는지를 계측하기 위하여 연결재 주변 압축부재 상부 플랜지와 연결재와 압축부재가 고정력 볼트에 의해 체결된 부위에 변형률게이지를 한쪽 압축부재 당 13개씩 양쪽으로 26개를 설치하여 계측하였다.

연결재에 작용하는 하중을 계측하기 위하여 연결부 중앙에 변형률게이지를 3개씩 총 9개를 설치하여 계측하였다.

5. 실험 결과 및 분석

조립식 압축부재의 연결재 간격의 영향에 따른 좌굴 파괴 거동을 평가하기 위하여 실험 대형 실험을 실시한 결과 Table 4와 같다. C4 실험의 경우 가력시스템의 한계로 인하여 좌굴하중까지 가력을 못하였다. 그래서 동일한 실험 조건하의

(a) C4

(b) C5

(c) C6

Fig. 9 Position of measuring instruments

Table 4. Results of experiments *Estimate

	Load (kN)			Longitudinal (mm)		Lateral (mm)
	P1	P2	Total P	P1	P2	
C4	1948	1948	3896 (4800*)	27.4	25.6	13.7
C5	1660	1661	3321	28.8	26.1	47.2
C6	1247	1246	2493	28.4	25.3	37.1

Table 5. Results of C4 with eccentricity

	Load (kN)			Longitudinal (mm)		Lateral (mm)
	P1	P2	Total P	P1	P2	
C4-E1	2313	1542	3854	37.3	24.3	48.7
C4-E2	2245	962	3208	33.2	21.5	47.1

Fig. 10 Results of C4 with eccentricity

편심하중을 적용한 실험체를 근거로 좌굴 하중을 추정하였다. Table 5는 편심하중을 적용한 C4 실험체의 실험 결과를 정리한 표이고 Fig. 10은 C4 실험의 편심하중을 적용한 실험체의 실험결과를 도시한 것이다.

C4 실험체의 좌굴하중을 추정하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. “부재의 제작 및 시공오차에 의한 초기결함, 잔류응력, 단면형상 등의 이유로 좌굴 파괴는 항복응력 (240MPa) 이전에 발생할 것이다”.

편심하중이 작용하였을 때의 식 (4)에서 α 를 결정하기 위하여 α 를 변화시키면서 C4-E1, C4-E2의 합성응력을 구해보면 Table 6과 같다. 그래서 합성응력이 항복응력과 유사한 값을 보이는 $\alpha=0.55$ 로 결정하였다.

C4 실험체의 좌굴 하중을 추정하기 위하여 식 (5)를 이용하여 합성응력 값을 변화시키면서 좌굴하중을 산출해 본 결과 Table 7과 같다.

따라서 부재의 제작 및 시공오차에 의한 초기결함, 잔류응력, 단면형상 등의 이유로 항복응력의 약 10% 정도가 감소된 216MPa 정도에서 좌굴할 것이라 판단하여 C4 실험체의 좌굴하중을 4800 kN으로 추정하였다.

Table 6. Combined stresses of C4 with eccentricity by α (MPa)

α	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
f_{E1}	558.7	359.8	293.5	260.3	240.4
f_{E2}	729.4	431.5	332.3	282.7	252.9
α	0.55	0.6	0.7	0.8	0.9
f_{E1}	233.2	227.2	217.7	210.6	205.1
f_{E2}	242.1	233.1	218.9	208.3	200.0

Table 7. Buckling loads of C4 by combined stresses

f (MPa)	210	220	230	240
P (kN)	4,615	4,835	5,055	5,274

Fig. 11 Buckling loads by distance of connection members

5.1 좌굴 하중

연결재 간격 4 m, 5 m, 6 m에 따른 좌굴 하중을 비교한 결과 Fig. 11과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 연결재 간격이 증가함에 따라 좌굴 하중은 비선형적으로 급격히 감소하는 것을 알 수 있고 추세선을 거듭제곱 식으로 표현하면 $P_{cr} = 45000C^{-1.6}$ 식이 도출되었으며 이 식의 상관계수 $R^2 = 0.99$ 로 나타났다.

Table 8은 조립식 압축부재의 이론 하중, 유한요소해석 결과, 실험 결과를 비교 한 표이다.

연결재 간격이 증가함에 따라 Timoshenko 및 F.E.M의 좌굴 하중이 감소하는 것을 알 수 있으나 F.E.M의 좌굴 하중은 급격한 감소를 보이는 것으로 나타났다.

실험값을 기준으로 Timoshenko 및 F.E.M 값과 비교해 보면 C4 실험의 좌굴 하중은 Timoshenko 및 F.E.M 결과보다 각각 9.5%, 1.4% 높게 나타났고 C5 실험의 좌굴 하중은 Timoshenko 보다 14.8% 낮게 나타났고 F.E.M 결과보다 25.5% 높게 나타났으며 C6 실험의 좌굴 하중은 Timoshenko 값 보다 27.5% 낮게 나타났고 F.E.M 결과보다 34.1% 높게 나타났다.

전체적으로 연결재 간격이 증가함에 따라 실험 좌굴 하중과 Timoshenko 좌굴 하중의 차이 및 실험 좌굴하중과

Table 8. Comparison of buckling loads

	Timoshenko (kN)		F.E.M (kN)	Experimental (kN)	Differences (%)	
	(1)	(2)			Timoshenko (1)	F.E.M
C4	4383	4322	4736	4800	-9.5	-1.4
C5	3899	3838	2647	3321	14.8	-25.5
C6	3440	3384	1859	2493	27.5	-34.1

F.E.M 좌굴 하중의 차이는 점점 증가하는 것으로 나타났다.

5.2 종방향 변위

Fig. 12는 하중 가력에 따른 종방향 변위를 나타낸 그래프이다. 종방향 변위 그래프를 살펴보면 3개의 실험체 모두 전체좌굴 직전까지 비선형 구간은 나타나지 않았다.

그래프의 이론값은 $\delta=PL/EA$ 식을 이용한 전단면이 유효한 그래프이고 실험값은 계측값에 계측오차를 보정한 값이다.

실험값과 이론값의 차이는 Fig. 13과 같이 횡변위에 따른 압축부재와 압축부재의 연결부에서의 벌어짐 또는 휨변위 발생으로 인한 인장부 발생 등으로 전체 유효단면적이 감소한 것으로 판단된다.

C4, C5, C6 실험의 각각의 경우 이론값의 전체단면적을 5%, 23%, 45% 감소시킨 0.95A 그래프, 0.73A 그래프, 0.55A 그래프와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 12 Longitudinal displacements by loads

Fig. 13 Decreases of effect area by lateral displacements at compression member's connecting parts

종방향 변위는 연결재 간격이 증가될수록 이론값에 비하여 증가된 변위를 보이고 이는 연결재 간격의 증가에 따른 조립식 압축부재의 전체 휨강성이 저하되어 하중에 따른 횡변위 증가로 압축유효단면적이 감소한 것으로 판단된다.

5.3 횡방향 변위

Fig. 14는 실험체 위치별 하중 재하에 따른 좌굴 직전까지의 횡방향 변위를 나타낸 그래프이다.

C4, C5, C6의 실험체 모두 횡변위 형상은 하중 가력부의 변위가 크게 나타났고 3개의 실험체 모두 변곡점은 압축부재 연결부인 10 m와 20 m인 지점 근처에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 10 m 압축부재의 길이 제작오차로 인하여 압축부재 연결부 단면에서 하중 재하에 따라 Fig. 15와 같이 꺾임이 발생하여 나타난 현상이라고 판단된다.

C4 실험의 최대 횡방향 변위는 총 하중 3896 kN까지 L5에서 13.7 mm가 발생하였고 하중이 증가함에 따라 횡방향 변위는 3.5 mm/1000 kN의 일정한 값으로 증가하였다.

Fig. 14 Lateral displacements by loads

Fig. 15 Bend at compression member's connecting parts

(a) C5 (b) C6

Fig. 16 Final buckling shapes

C5 실험의 최대 횡방향 변위는 24 m 지점에서 47.2 mm가 발생하였고 총 하중이 2,500 kN까지 횡변위가 약 5 mm/1,000 kN으로 거의 일정하게 증가하다가 2,500 kN부터 3,000 kN까지는 횡변위가 증가되면서 19 mm/1,000 kN으로 증가하고 3,000 kN에서 3,321 kN까지는 33 mm/1,000 kN으로 급격히 증가하다 전체 좌굴에 이르렀다.

C6 실험의 최대 횡방향 변위는 28 m 지점에서 37.1 mm가 발생하였고 총 하중이 1,000 kN까지 횡변위가 약 5 mm/1,000 kN으로 거의 일정하게 증가하다가 1,000 kN에서 2,000 kN까지는 횡변위가 증가되면서 13 mm/1,000 kN으로 증가하고 2,000 kN에서 2,493 kN까지는 35 mm/1,000 kN으로 급격히 증가하다 전체 좌굴을 보였다.

좌굴 파괴는 하중을 재하 하는 도중 어느 순간 갑자기 횡변위가 급격히 커지면서 Fig. 16과 같이 전체적인 좌굴 파괴 형상을 보였다.

5.4 종방향 변형률

Fig. 17은 종방향 변형률을 나타낸 그래프이다. 여기서 $\epsilon_{th} = (P/EA)$ 식을 이용하여 계산한 이론값이고 ϵ_{avg} 는 계측값을 평균한 값이다.

C4 실험의 종방향 변형률 그래프를 보면 평균 변형률은 이론 변형률보다 다소 크게 측정이 되었고 S42의 하중 가력부와 S47의 지점부 변형률은 각각 $1161 \mu\epsilon$ 과 $1173 \mu\epsilon$ 의 변형률을 보였으며 이는 이론 변형률 $796 \mu\epsilon$ 보다 각각 46%, 47% 크게 계측이 되었다.

C5 실험의 평균 변형률은 이론 변형률 $674 \mu\epsilon$ 과 유사한 값을 보이 있고 S42에서 최대 $744 \mu\epsilon$ 으로 이론값의 10.4% 크게 계측되었으며 S47에서 최소 $582 \mu\epsilon$ 으로 이론값의 13.6% 작게 계측되었다.

C6 실험의 평균 변형률은 이론 변형률 $505 \mu\epsilon$ 보다 조금 큰 값을 보이고 S47에서 최대 $818 \mu\epsilon$ 으로 이론값의 62.0% 크게 계측되었으며 S46에서 최소 $435 \mu\epsilon$ 으로 이론값의 13.8% 작게 계측되었다.

종방향 변형률은 연결재 간격의 증가와 무관하게 전체적으로 평균 변형률은 이론 변형률보다 다소 큰 값이 계측되었고 국부적으로 큰 압축력을 받는 것으로 나타났다. 이는 자재 제작오차 및 횡변위로 인한 압축부재 연결부의 유효단면적 감소로 판단된다.

(a) C4

(b) C5

(c) C6

Fig. 17 Longitudinal strains by loads

6. 결 론

본 논문에서는 비대칭 연결재를 갖는 총 길이 30 m의 조립식 압축부재의 연결재 간격에 따른 좌굴거동을 알아보기 위한 실험 대형 실험, 유한요소해석, Timoshenko 식에 의한 좌굴 하중 산정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연결재 간격이 증가함에 따라 좌굴 하중은 비선형적으로 급격히 감소하는 것을 알 수 있었고, 연결재 간격에 따른 실험 좌굴 하중과의 관계식을 거듭제곱 식으로 표현하면 $P_{cr} = 45,000C^{-1.6}$ 라는 식이 도출되었다.
2. 연결재 간격이 4 m, 5 m, 6 m로 증가함에 따라 실험 좌굴 하중과 Timoshenko 식의 좌굴 하중의 차이는 9.5%, 14.8%, 27.5%로 증가하고, 실험 좌굴하중과 유한요소해석 좌굴하중의 차이 또한 1.4%, 25.5%, 34.1%로 증가하는 것으로 나타났다.
3. 종방향 변위는 연결재 간격이 증가될수록 이론값($\delta = PL/EA$)에 비하여 증가된 변위를 보이는 것으로 나타났다. 이는 연결재 간격의 증가에 따른 조립식 압축부재의 전체 휨강성의 저하로 횡변위가 증가되어 인장부 발생 및 압축부재의 연결부 벌어짐으로 압축유효단면적이 5%, 23%, 45% 감소한 것으로 판단된다.

4. 연결재 간격이 증가함에 따라 전체 휨강성의 저하로 하중 증가에 따른 횡변위 증가량도 커지는 것을 알 수 있었다.
5. 종방향 변형률은 연결재 간격의 증가와 무관하게 전체적으로 평균 변형률은 이론 변형률($\epsilon_{th} = P/EA$)보다 다소 큰 값이 계측되었고 국부적으로 큰 압축력을 받는 것으로 나타났다. 이는 초기변형, 횡변위에 따른 압축유효단면적 감소, 자재 제작오차 등의 이유로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)씨포텍의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김성보, 한만엽, 김문영, 김낙경, 한진희(2005) 혁신적 프리스트레스트 가시철 구조시스템(IPS)에 적용되는 중간 압축부재의 해석 및 설계. **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, pp. 627-636.

- 김진용, 김성보(2011) 강재 조립 기둥의 좌굴거동에 대한 매개변수 해석. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제31권 제2호, pp. 79-87.
- 신영재, 김재호, 정인식(2011) GDQM에 의한 띠판을 갖는 조립 칼럼의 좌굴해석. **한국소음진동공학회 논문집**, 한국소음진동공학회, Vol. 11, No. 9, pp. 462-474.
- 양창현(2008), 구조역학, 청문사
- 최성준, 윤종열, 윤순중(1997) 좌굴강도를 고려한 더블 L형 압축재의 설계. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제17권 제6호, pp. 947-955.
- Aslani, F. and Goel, S.C. (1991) Analytical criterion for buckling strength of built-up compression members. *Eng. J. AISC*, Vol. 28, No. 4, pp. 159-168.
- Bleich, F. (1952) *Buckling Strength of metal structures*. 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Engesser, F. (1891) Die Knickfestigkeit Grader stabe. *Zeitalblatt der Bauverwaltung*, Vol. 11, pp. 483, German.
- Temple, M.C. and Elmahdy, G. (1993) Buckling of built-up compression members in the plane of the connectors. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 895-909.

(접수일: 2012.2.16/심사일: 2012.4.4/심사완료일: 2012.6.5.)