철골 모듈러 구조물의 포스트텐션 기둥-바닥 접합부 거동에 대한 해석적 연구

최 경 석¹·신 동 현²·김 형 준^{3†}

¹롯데건설(주) 기술연구원 선임연구원, ²서울시립대학교 건축공학과 박사후연구원, ³서울시립대학교 건축공학과 교수

Analytical Study on Structural Behaviors of Post-Tensioned Column-Base Connections for Steel Modular Structures

Kyung-Suk Choi¹, Dong-Hyeon Shin² and Hyung-Joon Kim^{3†}

¹Senior Researcher, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, Seoul, 04314, Korea

²Postdoctoral Fellow, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

Abstract

Modular structures are relatively lightweight compared to reinforced-concrete or steel structures. However, it is difficult to achieve structural integrity between the columns of unit modules in a modular structure, which causes undesirable effects on the lateral force resistance capacity against wind and earthquake loads. This is more prominent in modular structures whose overall heights are greater. Hence, a post-tensioned modular structural system is proposed herein to improve the lateral force resistance capacity of a typical modular structure. A post-tensioned column-base connection, which is the main component of the proposed modular structural system, is configured with shapes and characteristics that allow inducing self-centering behaviors. Finite element analysis was then performed to investigate the hysteretic behaviors of the post-tensioned column-base connection. The analysis results show that the hysteretic behaviors are significantly affected by the initial tension forces and beam-column connection details at the base.

Keywords : steel modular structure, post-tensioned column-base connection, finite element method (FEM), cyclic behavior

1. 서론

공장에서 미리 제작된 개별 단위 모듈을 현장으로 운반, 적층 및 체결을 하는 모듈러 건축물은 공장생산으로 인해 효율적인 품질 관리가 가능하며, 공사기간을 단축시키고, 해체 및 재사용이 가능한 장점을 가진다. 하지만 기존 철근콘크리트 및 철골 구조물에 비하여 상대적으로 경량이고, 분절된 상·하부 단위 모듈의 기둥을 단순히 볼트 접합하기 때문에 기둥의 일체성을 기대하기 어려운 구조적 특성을 가진다. 이와 같은 구조적 특성은 모듈러 건축물의 높이가 높아짐에 따라 바람 및 지진과 같은 횡력 저항성능에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 모듈러 건축물의 공법과 구조적 특성을 고려하여 횡력 저항성

능을 확보하기 위한 시도 및 연구가 최근 다양하게 이루어지고 있다.

국외에서 시공된 고층 모듈러 건축물의 경우, 대부분의 횡력을 저항하는 주 구조요소인 철근콘크리트 전단벽 혹은 철골 가새 골조에 단위 모듈을 접합하는 복합 구조시스템이 주로 사용되었다(Gorgolewski *et al.*, 2001; Lawson *et al.*, 2012). 하지만 복합 구조 시스템은 주 횡력저항시스템이 우선적으로 시공되어야 하기 때문에 모듈러 건축물 공법의 장점 중 하나인 공기 단축의 효율이 다소 떨어진다.

Annan 등(2008; 2009)은 추가적인 횡력저항시스템 없이 모듈러 건축물의 횡력저항성능을 확보하기 위해 단위 모듈을 X형 가새 부재로 보강하고, 상·하 모듈을 부분 용접 접합하는 모

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-6490-2763; E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

Received October 25 2020; Revised November 4 2020;

Accepted November 5 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

둘러 구조 시스템을 제안하였다. 하지만 제안된 모듈러 구조 시스템은 가새의 좌굴 및 항복강도에 의한 작용 축력을 고려한 기둥 설계가 이루어졌으며, 이로 인해 각 층의 기둥이 다른 단면을 가진다. 일반적으로 모듈러 건축물은 공장에서 동일한 규격으로 단위 모듈을 제작하기 때문에 이러한 구조 시스템을 도입하는 것은 비효율적일 뿐만 아니라, 가새는 시각 및 공간적 제약으로 인해 설치 위치가 제한적이다.

일부 모듈러 제조업체는 시공성을 향상시키기 위해 기존의 볼트 접합이 아닌 적층된 각 단위 모듈들의 기둥 내부에 강선 혹은 강봉을 관통 시킨 후 긴장력을 도입하여 동시에 접합하는 방식을 제안하였으며, 접합부 실험을 통한 구조적 안전성을 입증하였다(Zeng *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2018).

본 연구에서는 이상의 접합방식과 유사하게 긴장재를 활용하여 각 단위 모듈을 접합시켜 시공성을 향상시킴과 동시에 소프트닝 거동(softening behavior)과 셀프 센터링 거동(self-centering behavior)을 유도할 수 있는 포스트텐션 기둥-바닥 접합부(post-tensioned column-base connection, PTCBC)는 기존 포스트텐션 기법을 도입한 구조 시스템과 동일하게 주요 구조 부재인 보와 기둥의 손상을 방지하고, 잔류 변형을 제어할 수 있을 것으로 예상되며, 이와 같은 구조적 거동 및 성능을 파악하기 위해 유한 요소해석 모델을 수립한 후 비선형 정적해석을 수행하였다.

2. 포스트텐션 기둥-바닥 접합부가 도입된 모듈러 구조 시스템 개요

2.1 형상 및 구성요소

본 연구에서 제안한 PTCBC가 적용된 모듈러 구조 시스템의 개략적인 형상과 구성요소는 Fig. 1과 같다. 긴장재인 강봉은 각층강관 내부를 관통하여 수직적으로 배치되어 최하단부인 바닥과 기둥 최상단부에 정착되며, 시스템을 구성하는 접합부 요소는 최상부의 긴장재를 정착하는 접합부, 상·하부 모듈 간 접합부, 그리고 포스트텐션 기둥-바닥 접합부로 구분된다.

그림에서 확인할 수 있듯이 강봉은 긴장력 도입 이후 포스트텐션 앵커를 이용하여 기둥 상단부에 정착되며, 응력 집중 현상을 방지하기 위해 철판을 덧대어 보강한다.

상·하부 단위 모듈 간 접합부는 강봉을 관통시킨 후 긴장력을 도입함으로써 수직 방향의 단위 모듈이 동시에 연결된다. 따라서, 기존의 볼트 접합을 위한 개구부의 가공을 피할 수 있기 때문에 전단저항 면의 단면 결손을 방지할 수 있다.

마지막으로 핵심 구성요소인 PTCBC는 강봉을 정착시킬 수 있는 베이스 철물과 기둥의 수평 방향 변형을 구속하기 위한 스톱퍼(stopper) 철물로 구성된다. 기둥과 바닥의 직접적인 접합이 이루어지지 않고 기둥 내부를 관통하는 긴장재만 바닥과 정착되기 때문에 수평 방향 이동을 구속하기 위한 스톱퍼

Fig. 1 Shape and detail of a modular structural system with post-tensioned column-base connections

철물이 필요하고, 기둥 측면에 접촉되지 않도록 대략 20mm 이격하여 설치한다.

2.2 포스트텐션 기둥-바닥 접합부의 구조적 거동

건물의 수평 혹은 수직 방향으로 긴장재를 활용한 구조 시스템의 거동은 대부분 해석적, 실험적 연구를 통해 규명되었으며(Christopoulos *et al.*, 2002; Chi and Liu, 2012), 기존 연구를 바탕으로 다음과 같이 PTCBC의 거동을 역학적으로 나타낼 수 있다.

PTCBC가 적용된 1개 단위 모듈에 횡력이 작용하였을 때, PTCBC의 변형 형상 및 모멘트와 상대 회전각($M_b - \theta_r$) 관계를 Fig. 2에 나타내었다.

점차 증가하는 횡력으로 인해 작용하는 바닥 접합부의 모멘트가 긴장재의 초기 긴장력($T_{p,i}$)과 기둥의 축력($P_{c,i}$)에 의한 모멘트 저항력보다 커지면, 기둥 하단부가 베이스 철물의 표면으로부터 떨어지는 갭(gap)현상으로 인해 상대 회전각(θ_r)이 발생한다. 이때, 기둥의 압축축 플랜지와 바닥의 접촉점을 회전 중심으로 가정한다면 갭이 발생하는 압축상쇄모멘트(M_d)는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$M_d = (T_{p,i} + P_{c,i}) \frac{d_c}{2} \quad (1)$$

여기서, d_c 는 모듈 기둥의 단면 폭이다. PTCBC의 주요한 거동인 압축상쇄로 인한 갭 발생은 초기 도입 긴장력과 기둥의 작용 축력에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있다.

바닥면에서의 갭이 발생한 이후 기둥은 회전 중심을 기준으로 회전하며, 이로 인해 긴장재는 인장변형이 발생한다. 긴장

재의 인장변형은 추가적인 축력을 PTCBC에 유발시키고, 기둥은 압축변형이 발생한다. 따라서, 긴장재의 유효 축방향 강성(k_{pt})은 식 (2)와 같이 긴장재와 단위 모듈 기둥의 축강성을 직렬 연결하여 산정할 수 있다.

$$k_{pt} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_c}} \quad (2)$$

여기서, k_p 와 k_c 는 각각 긴장재와 기둥의 축방향 강성으로 다음과 같이 계산된다.

$$k_p = \frac{E_p A_p}{L_p} \quad (3)$$

$$k_c = \frac{E_s A_c}{L_c} \quad (4)$$

E_p, A_p, L_p 및 E_s, A_c, L_c 는 각각 긴장재 및 기둥의 탄성계수, 단면적, 길이를 의미한다.

미소 변형의 가정 아래 긴장재의 인장 변위(δ_p)는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\delta_p = \frac{d_c}{2} \theta_r \quad (5)$$

따라서, 긴장재의 인장변형으로 인한 추가적인 축력(ΔT_p)은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\Delta T_p = k_p \delta_p \quad (6)$$

Fig. 2 Moment - relative rotation relationship of a post-tensioned column-base connection

식 (2)~(5)를 식 (6)에 대입하고, 긴장재와 기둥의 길이가 동일($L_p=L_c$)한 조건을 고려하면, ΔT_p 는 식 (7)과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\Delta T_p = \frac{d_c}{2L_p} \left(\frac{E_p A_p E_s A_c}{E_p A_p + E_s A_c} \right) \theta_r \quad (7)$$

그리고 ΔT_p 의 영향으로 인해 PTCBC에 작용하는 추가 모멘트(ΔM_p)는 다음 식과 같이 산정할 수 있다.

$$\Delta M_p = \Delta T_p \frac{d_c}{2} \quad (8)$$

따라서, PTCBC의 갭이 발생한 이후의 회전 강성(k_d)은 식 (7)을 식 (8)에 대입함으로써, 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$k_d = \frac{d_c^2}{4L_p} \left(\frac{E_p A_p E_s A_c}{E_p A_p + E_s A_c} \right) \quad (9)$$

PTCBC의 갭 발생 이후의 강성은 단위 모듈의 크기 및 긴장재와 기둥의 단면 형상에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 갭 발생 이후의 포스트텐션 바닥 접합부에 작용하는 모멘트, M_b 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$M_b = (T_{p,i} + P_{c,i} + \Delta T_p) \frac{d_c}{2} \quad (10)$$

이상의 PTCBC의 구조적 거동은 다음과 같은 가정에 의해 유도되었으며, 포스트텐션링 기법을 적용한 철골 구조물에서 고려하는 일반적인 가정과 동일하다.

- 접합부의 변형은 미소 변형의 가정을 따른다.
- 긴장재는 초기 도입한 긴장력을 유지한다.
- 접합부를 구성하는 주요 구조 부재는 탄성을 유지한다.

마지막 구조적 가정에 따라 접합부에 갭이 발생하더라도, 잔류 변형 없이 원래 위치로 돌아가려는 복원 능력을 발휘할 것으로 예상되며, 이는 전형적인 셸프 센터링 시스템의 거동 특성이다.

3. 포스트텐션 기둥-바닥 접합부의 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델

본 연구에서 제안한 PTCBC의 구조적 거동을 상세히 파악하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 상용프로그램인 ABAQUS 6-10(2010)을 사용하였으며, Fig. 3에 수립된 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석모델에 고려한 단위 모듈은 실무에서 사용되고 있는 대표적인 형상 및 상세를 참조하였으며, 기둥은 B-125×125×9, 보는 C-200×75×6의 단면을 가진다.

PTCBC 해석모델은 구조적 거동에 직접적인 영향을 주는 구성요소를 위주로 단순화하여 모델링하였으며, 단위 모듈 보-기둥 골조, 긴장재, 상부 연결 플레이트(connection plate), 그

Fig. 3 FEM model of beam-column and column-base connections in a post-tensioned modular structure

리고 바닥의 스톱퍼 서포트(stopper support)로 구성된다. 단위 모듈 보-기둥 골조의 경우, 용접부에서의 파괴는 발생하지 않는다는 가정 아래 용접에 대한 별도의 해석 요소를 고려하지 않았으며 보-기둥 접합부를 일체화하여 모델링하였다. 긴장재는 각형 강관 내부를 관통하여 상부 연결 플레이트와 바닥의 스톱퍼 지점에 접합되며 구속 조건을 부여하였다. 상부 연결 플레이트와 바닥의 스톱퍼 서포트는 강체(rigid body) 요소로 모델링하였으며, 스톱퍼 서포트의 경우 PTCBC의 수평 방향 변위를 구속할 수 있도록 L형상으로 모델링하였다.

연결 플레이트 및 스톱퍼 서포트와 단위 모듈 보, 기둥의 접촉면에서의 마찰 거동을 모사하기 위해, 접촉면의 수평 방향으

로 Coulomb friction 조건을, 접촉면의 수직 방향으로 Hard contact 조건을 정의하였으며, 이때 마찰계수는 0.2를 적용하였다. 지점 조건은 스톱퍼 서포트 하부면을 고정단 지점으로 정의하였다.

Fig. 4에 해석에 사용된 재료 모델인 단위 모듈 보, 기둥의 SM355 강재와 PT 강봉의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. SM355 강재의 공칭항복강도, $F_{y,s}$ 는 325MPa이고, 공칭인장강도, $F_{u,s}$ 는 490MPa이며, PT 강봉의 공칭항복강도, $F_{y,p}$ 는 800MPa이다. 해석에 적용한 철골의 탄성계수 및 포아송 비는 각각 205GPa과 0.3이며, 항복 이후 변형도 경화 현상과 공칭인장강도 도달 이후 강도 및 강성 저감 현상을 고려하였다. PT 강봉의 탄성 계수 및 포아송 비는 각각 185GPa과 0.3을 적용하였으며, 완전-탄소성 곡선으로 모델링하였다.

PTCBC의 유한요소해석은 총 2단계로 나누어 해석을 수행하였으며 Fig. 5에 각 단계별 해석과정의 하중 조건을 나타내었다. 1단계 해석은 강봉에 긴장력을 도입하는 해석을 수행하였으며, 각 기둥에 위치한 2개 PT 강봉 요소에 긴장력을 동시에 도입하였다. 2단계 해석은 PTCBC의 횡방향 거동특성을 파악하기 위해, 상부 보의 길이방향으로 AISC(2005)에서 제시하는 반복 가력 패턴을 참조하여 하중을 입력하였다. 층간변위비가 0.375~4%까지 정현파 형태의 반복변위를 각 1사이클씩 가력하였다.

PTCBC의 거동 특성을 파악하기 위해 Table 1과 같이 긴장재의 초기 긴장력과 단위 모듈 하부 보와 기둥의 접합 조건을 변수로 해석을 수행하였다. 초기 긴장력은 PT 강봉의 최대 강도인 800MPa의 30%와 50% 수준인 240MPa와 400MPa를 변수로 적용하였으며, 하부 보-기둥의 접합부는 강접과 핀 접합을 변수로 설정하였다. 핀 접합을 가지는 해석 대상인 P30과 P50은 유한요소해석 모델에서 단위 모듈 하부 보를 제거한 뒤 해석을 수행하였다.

3.2 유한요소해석 결과

3.2.1 하중-변위 이력 거동

Fig. 6은 각 해석모델의 하중 - 최상단부 변위 이력 곡선으로, 초기강성(K_i) 및 접합부에 갭이 발생하는 시점의 하중(V_g)을 함께 나타내었다.

(a) SM355

(b) PT steel bar

Fig. 4 Stress-strain relationship implemented into FEM analysis

(a) 1st step : pre-stressing PT steel bars

(b) 2nd step : cyclic loading

Fig. 5 Analysis steps from a pre-stressing stage

Table 1 Summary of analytical parameters

Denotation	Prestress of PT bar σ_i [MPa]	Connection type of floor beam-column joints
F30	240 ($\approx 0.3 F_{yp}^*$)	Fully restrained joint, FR
F50	400 ($\approx 0.5 F_{yp}$)	Fully restrained joint, FR
P30	240 ($\approx 0.3 F_{yp}$)	Pinned joint, Pin
P50	400 ($\approx 0.5 F_{yp}$)	Pinned joint, Pin

F_{yp} : Yield stress of PT steel bar, 800MPa

하부 보와 기둥의 접합 조건에 따라 해석 대상의 이력 거동이 상당히 다르게 나타났다. 하부 보-기둥 접합 조건을 강접합으로 고려한 F30, F50 해석모델은 일반적인 철골 모멘트 저항 골조와 유사한 이력 거동을 보이는 반면, 핀접합으로 고려한 P30, P50 해석모델은 셀프센터링 거동을 하는 것으로 나타났다. 이는 단위 모듈을 구성하는 보-기둥 골조의 모멘트 저항능력에 의한 영향 때문이다.

횡력에 저항하는 성분은 PTCBC의 셀프센터링 거동에 의한 저항력과 단위 모듈의 골조 효과에 의한 저항력으로 구분할 수 있다. 따라서, 하부 보와 기둥의 접합을 강접합으로 고려한 해석 대상이 핀접합으로 고려한 해석 대상에 비하여 골조 효과에 의한 횡력 저항 기여분이 상대적으로 크고, 대부분의 횡력을 저항하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 영향으로 인해 접합부의 갭이 발생한 이후에도 초기강성과 유사한 강성을 유지하며 구조 부재의 항복으로 인해 에너지 소산능력이 증가하고 상당한 잔류 변형이 발생하였다. F30과 P50의 구조 부재의 항복이 발생하는 층간 변위비는 각각 1.7%와 2.0%로 평가되었다. 결과적으로 F30과 F50은 지점 조건이 고정단이고 긴장재가 없는 보-기둥 골조의 횡력 저항 성능과 크게 다르지 않을 것으로 예상된다.

하부 보와 기둥이 핀접합으로 고려된 P30과 P50은 셀프센

터링 거동을 보이며, 3% 이상의 층간변위비에서 구조 부재의 항복으로 인해 잔류 변형이 다소 발생하였다. 특히 P50은 4% 층간변위비일 때 구조 부재가 항복하였다.

초기 긴장력이 상대적으로 작은 해석 대상인 P30의 갭 발생 하중은 P50에 비하여 상당히 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 포스트텐션 바닥 접합부의 압축상쇄 모멘트 저항력이 굉장히 작은 것을 의미하며, 횡력이 작용함과 거의 동시에 갭 발생으로 인한 셀프 센터링 거동을 하는 것으로 볼 수 있다. 반면 P50은 1%의 층간 변위비 이후 접합부의 갭 오픈링 거동을 하는 것으로 나타났다.

3.2.2 변형 형상 및 응력 분포

Fig. 7에 층간 변위비가 4%에 도달하였을 때 각 해석 대상의 변형형상 및 Von Mises 응력 분포를 나타내었다. 우측에 위치한 PTCBC의 부분 확대도를 살펴보면, 기둥과 스토퍼 서포트의 접촉으로 인한 락킹(rocking)현상과 함께 접촉면을 중심으로 기둥의 응력이 집중되는 현상이 발생한다. 응력 집중 현상은 모든 해석 대상에서 공통적으로 관찰되었으나, 강도나 강성을 저하시키지 않는 것으로 나타났다.

F30과 F50은 일반적인 철골 모멘트 저항 골조와 동일하게 보와 기둥의 중앙부에서 단부로 갈수록 점차 응력이 커지고,

Fig. 6 Load-displacement relationships of four analysis models

Fig. 7 Deformed shapes and stress contours of four test models imposed to a 4% drift ratio

보-기둥 접합부 부근에서 최대 응력이 발생하는 응력 분포를 보인다. 특히 상부 보는 기둥 접합부 부근에서 전단면이 소성화되었다.

P30과 P50 역시 상부 보-기둥 접합부를 중심으로 높은 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으나, 전단면이 아닌 상·하부 플랜지만 항복하였다. P30은 기둥의 하단부로 갈수록 점차 응력이 감소하며 탄성 상태를 유지하였으나, P50은 스톱퍼 서포트의 락킹 현상과 상대적으로 높은 축력으로 인해 압축축 플랜지에서 항복이 발생한 것으로 확인되었다.

3.2.3 PTCBC의 모멘트-상대 회전각 관계

Fig. 8에 PTCBC의 모멘트-상대 회전각 곡선을 나타내었으며, 앞 절에서 역학적으로 유도한 모멘트-상대 회전각 곡선을 비교하여 나타내었다.

PTCBC의 유한요소해석 결과, 가력 방향에 따라 비대칭적인 이력거동을 보인다. 이는 기둥과 스톱퍼 서포트의 락킹

(rocking) 현상으로 인해 발생하는 것으로, 기둥의 회전이 스톱퍼 서포트에 의해 구속되기 때문이다. 따라서, 스톱퍼 서포트와 접촉되는 방향의 락킹 현상으로 인한 지압력이 작용함으로써 모멘트 및 강성이 예측 결과보다 다소 크게 나타났다. 반면 F30을 제외한 각 해석모델의 락킹 현상이 발생하지 않는 가력 방향에 대한 예측 결과는 유한요소해석 결과와 잘 대응하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 갭이 발생하는 압축상쇄모멘트와 갭 발생 이후의 강성을 신뢰성 있게 예측하는 것으로 나타났다.

F30의 경우 다른 해석모델과 달리 불규칙적인 이력 거동을 보이는 이유는 스톱퍼 서포트에 의한 락킹이 발생하지 않는 반대편 방향으로 가력 시 미끄러짐 현상이 발생하기 때문이다. 즉 갭 발생 이후 기둥의 회전 중심이 수평 방향으로 이동한다. 기둥의 미끄러짐은 상대적으로 작은 초기 도입 긴장력, 구조 부재의 항복으로 인한 잔류 변형 등의 영향이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 판단된다. 해석 대상 P30 역시 기둥의 미

Fig. 8 PT force-relative rotation relationships of four analysis models

끄러짐이 발생하였지만, 4% 층간변위비에서 발생하였으며, 미끄러짐 변위가 F30에 비하여 크지 않은 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 모듈러 건축물의 횡력저항성능을 확보하기 위해 셀프 센터링 거동이 가능한 모듈러 구조시스템을 제안하였다. 제안된 구조시스템의 주요 구성요소인 포스트텐션 기둥-바닥 접합부(PTCBC)의 구조적 거동을 역학적으로 규명한 후, 초기 긴장력 및 보-기둥 접합 조건을 변수로 한 비선형 유한요소해석을 수행하여 PTCBC의 거동특성을 분석하였다. 이상의 해석적 연구를 통한 결론을 종합하면 다음과 같다.

- 1) 적절한 가정을 통해 역학적으로 유도된 PTCBC의 거동은 유한요소해석 결과와 비교하였을 때 실제 구조적 거동을 유사하게 예측하는 것으로 나타났다.
- 2) 유한요소해석 결과, 초기 긴장력 및 보-기둥 접합부의 접합 조건에 따라 PTCBC의 이력 거동은 확연한 차이를 보인다. 보와 기둥을 강접합하는 경우 셀프 센터링 거동보다는 골조 거동에 의한 영향이 크게 나타났다. 즉 접합부의 갭 발생 이후에도 초기강성과 유사한 강성을 유지함으로써 보와 기둥의 항복이 상대적으로 작은 변위에서

발생하였고 철골 모멘트 저항 골조와 유사한 방추형의 이력 거동을 보인다.

- 3) 반면, 안정적인 셀프 센터링 거동을 구현하기 위해서는 적절한 긴장력의 도입과 함께 보와 기둥을 핀접합함으로써, 골조 효과에 의한 횡력 저항 기여분이 작도록 유도하여야 한다. 이와 같은 조건에서 PTCBC는 갭 발생 이후 초기 강성보다 현저히 작은 강성으로 거동하기 때문에, 상대적으로 에너지 소산 능력은 떨어지지만 보와 기둥 부재의 손상을 방지하고, 변형 능력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) PTCBC에 셀프 센터링 거동을 도입할 경우 기존의 프레임에 비해 갭 발생 이후의 횡방향 강성이 감소할 수 있기 때문에 에너지 소산장치를 추가적으로 적용하여 보완할 필요가 있으며, 이에 대해서는 향후 추가적인 상세 제안 및 실험적 검증이 요구된다.

이상의 결론은 본 연구에서 제안한 모듈러 구조시스템의 구성요소 중 하나인 PTCBC에 대한 연구결과이며, 추후 모듈간 접합부의 거동 분석 등 제안한 모듈러 구조시스템의 횡력저항성능과 설계기법에 대한 실험적, 해석적 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경 연구사업의 연구비지원(과제번호 20RERP-B082884-07)에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS 6.10.** (2010) *Analysis User's Manual*, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- AISC** (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL: Americal Institute of Steel Construction.
- Annan, C.D., Youssef, M.A., El Naggar, M.H.** (2008) Seismic Overstrength in Braced Frames of Modular Steel Buildings, *J. Earthq. Eng.*, 13(1), pp.1~21.
- Annan, C.D., Youssef, M.A., El Naggar, M.H.** (2009) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames, *Eng. Struct.*, 31, pp.1435~1446.
- Chi, H., Liu, J.** (2012) Seismic Behavior of Post-Tensioned Column Base for Steel Self-Centering Moment Resisting Frame, *J. Constr. Steel Res.*, 78, pp.117~130.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C.M., Folt, B.** (2002) Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames, *ASCE J. Struct. Eng.*, 128(9), pp.1111~1120.
- Gorgolewski, M.T., Grubb, P.J., Lawson, R.M.** (2001) *Modular Construction Using Light Steel Framing : Design of Residential Buildings*, Steel Construction Institut, Berkshire, England.
- Jung, D.I., Cho, B.H., Lee, D.Y., Jung, C.W.** (2018) Seismic Performance Evaluation of Transverse Modular Building Unit with Post-tensioned Connections, *Proc. Archit. Inst. Korea*, 38(1), pp.581~582.
- Lawson, R.M., Ogden, R.G., Bergin, R.** (2012) Application for Modular Construction in High-Rise Buildings, *J. Archit. Eng.*, 18, pp.148~156.
- Zheng, T., Lu, Y., Usmani, A., Seeam, A., Laurenson, D.** (2012) Characterization and Monitoring of Seismic Performance of Post-Tensioned Steel Modular Structures, *15WCEE, Lisboa*, Portugal, September.

요 지

모듈러 건축물은 철근콘크리트 및 철골 구조물에 비하여 상대적으로 경량이고, 단위 모듈간 기둥의 일체성을 기대하기 어려운 구조적 특성을 가진다. 이와 같은 구조적 특성은 모듈러 건축물의 높이가 높아짐에 따라 바람 및 지진과 같은 횡력저항성능에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 횡력저항성능을 향상시키기 위해 긴장재를 활용한 모듈러 구조시스템을 제안하였다. 모듈러 구조시스템을 구성하는 주요 요소인 포스트텐션 기둥-바닥 접합부는 셀프 센터링 거동을 유도하기 위한 형상 및 상세를 가진다. 포스트텐션 기둥-바닥 접합부의 이력 거동을 상세히 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과 초기 긴장력 및 보-기둥 접합부의 접합 조건에 따라 이력 거동은 확연한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철골 모듈러 구조, 포스트텐션 기둥-바닥 접합부, 유한요소해석, 이력 거동