Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.29, No.6, pp.435-442, December, 2017

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2017.29.6.435

프리캐스트 콘크리트 벽체의 상하부에 C형강 보가 결합된 복합 패널의 개발

이상섭[1]* · 박금성[2]

[1]공학박사, 수석연구원, 한국건설기술연구원, [2]공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원

Development of Hybrid Panel with C-shaped Steel Beam at Top and Bottom of Precast Concrete Wall

Lee, Sang Sup[1]*, Park, Keum Sung[2]

[1]Ph.D. Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea
[2]Ph.D. Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract - A lateral load resisting system is a necessary structural element for the mid- to high-rise modular buildings and concrete cores are known as the most typical lateral load resisting systems in 10- to 20-story modular buildings. It is difficult to construct a concrete core simultaneously with the installation and finishing work of modular units because concrete placed using wet methods might contaminate or destroy the modular unit. Therefore, we have developed a hybrid PC (precast concrete) panel construction method that can construct a concrete core together with the installation of modular units. The hybrid PC panel is a load-bearing element in which a pair of C-shaped beams are combined at the top and bottom of a concrete wall. Concrete cores can be constructed by dry method to connect the hybrid PC panels with bolts. In this study, the details and connection of hybrid PC panels are improved to have the lateral performance comparable to reinforced concrete structural walls and are verified through FE analysis.

Keywords - Modular construction, Concrete core, Dry method, Hybrid precast concrete panel, Lateral load resisting system

1. 서 론

모듈러 공법은 규격화· 표준화된 모듈을 공장에서 제작하고 현장으로 운송하여 조립하는 공기단축이 가능한 건식공법으로 알려져 있다. 이러한 장점은 모듈러 건축물을 고층화하여 극대화할 수 있으며 이와 더불어 모듈러 건축 기술도 발전할 수 있을 것이다[1].

모듈러 건축물은 고층화에 따라 횡력저항시스템이 필요하며, Mills *et al.*[2]은 저층의 경우 적층된 모듈만으로 횡력저항이 가능하지만, 중층의 경우 가새 등의 안정화 시스템이 부가되어야 하며, 고층의 경우 콘크리트 코어나 가새 보강 철골 프레임 등의 별도 횡력저항시스템이 있어야 한다고 서술하였다.

해외 사례를 조사한 결과 10~20층 모듈러 건축물의 횡력저항시스템으로 콘크리트 전단벽 코어를 사용하는 경우가 많았다. 콘크리트 코어 벽체를 시공하는 방법은 모듈의 마감 완성도에 따라 달라질 수 있다. 모듈의 외부 마감 완성도가 높을 경우 Fig. 1(a)와 같이 콘크리트 코어를 먼저 완성하고 모듈을 적층해야 습식공사로 인한 파손이나 오염을 피할 수 있다. 반면 모듈의 마감 완성도가 높지 않은 경우 Fig. 1(b)와 같이 콘크리트 코어 공사와 모듈 적층 공사가 동시에 진행될 수 있으나 모듈에 별도 오염 방지 포장이 필요하고 건물 외부 마감 공사는 진행하기 어렵다. 이 두 경우 모두 양중 장비가

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 18, 2017; revised November 2, 2017; approved on November 2, 2017.
Copyright ⓒ 2017 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-31-910-0768 Fax. +82-31-910-0392
E-mail. lss0371@kict.re.kr

(a) Apex house

(b) Univ. of auckland

Fig. 1. Modular building constructions with concrete core walls

코어 공사와 모듈 적층에 사용하기 위해 양중 용량이 커야 하며, 고정 방법과 설치 위치 등이 고려되어야 한다. 따라서 횡력저항시스템으로 콘크리트 코어를 사용할 경우 모듈의 파손 및 오염 방지와 공기 단축을 위해 현장 타설 코어 벽체 대신 프리캐스트 콘크리트(이하 PC) 패널을 사용하는 것이 하나의 대안이 될 수 있을 것이다.

이에 이 논문에서는 횡력저항성능이 현장 타설 콘크리트 벽체와 동등하면서 모듈러 건축물의 콘크리트 코어를 최소의 습식 처리가 적용되도록 개발한 복합 PC 패널에 대해 소개하고, 해석적 비교를 통해 횡력저항성능을 높일 수 있도록 개선한 상세를 제시하고자 한다.

2. 복합 PC 패널의 개발

2.1 형상 및 구성

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 모듈러 건축물에 사용되는 박스형 골조식 모듈의 경우 하부층 상부보와 상부층 하부보가 만나는 층간대에서 접합이 이루어진다는 점에 착안하여 PC 패널의 상하부에 강재 보를 설치하여, 모듈을 적층해 나가는 방법과 동일하게 코어 벽체를 볼트로 접합하는 Fig. 3과 같은 패널을 고안하였다.

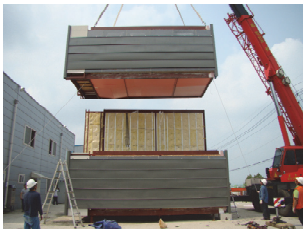


Fig. 2. Inter-story layer in modular building

일정 간격을 두고 웨브가 마주보는 한 쌍의 C형강을 PC 패널의 상부와 하부에 결합한 형태로 패널의 크기는 운송을 고려하여 폭은 2.4m를 기본으로 정하였고, 높이는 연결되는 모듈에 따라 달라질 수 있으나 3.0m로 정하였다.

C형강은 SS400의 강판을 절곡하여 제작하며, 콘크리트와 연결은 수직 철근을 C형강 플랜지에 용접하여 콘크리트에 매립한다. C형강에 접합되는 철근은 양 단부에 짧은 90도 갈고리를 형성하여 용접 내력을 확보할 수 있다. 또한 C형강의 플랜지에 일정 간격으로 볼트 구멍을 가공하여 적층되는 패널을 볼트 접합할 수 있도록 설계되었다.

복합 PC 패널의 두께는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 코어 위치를 3가지로 구분한 15층 규모 모듈러 건축물에 사용된 콘크리트 코어 벽체의 해석을 통해 횡력에 대한 사용성을 만족하는 저층부의 소요 두께를 확인하여 200mm로 결정하였다. 소요 철근은 벽체의 위치에 따라 달라지기 때문에 수직철근은 SD500 D13을 200mm 간격으로 배근하고, 수평철근은 SD500 D13을 300mm 간격으로 배근하고, 측면에는 U자형 철근으로 보강하는 것을 대표로 선택하였다. 그러나 실제 모

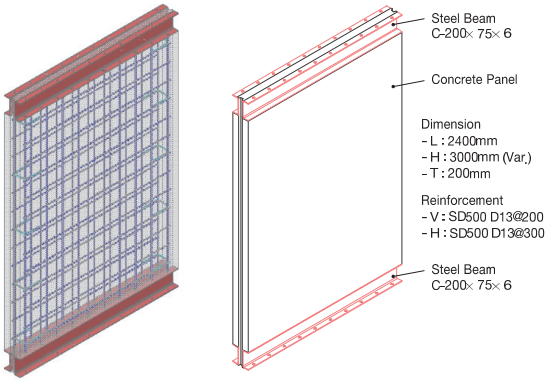
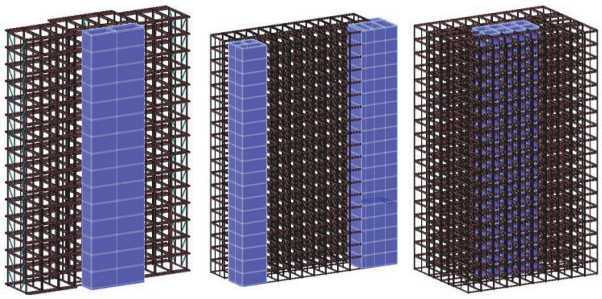


Fig. 3. Configuration of hybrid precast concrete panel



(a) Exterior core (b) Double core (c) Center core

Fig. 4. Core positions for mid- to high-rise modular buildings

듈러 건축물에서 철근 보강은 구조설계를 통해 결정해야 하므로 여기서 제시한 배근 상세는 변경될 수 있을 것이다.

2.2 접합 방식

모듈러 건축물에서 복합 PC 패널을 이용하여 코어 벽체를 구축하는 일례와 복합 PC 패널 사이에 발생하는 접합부를 Fig. 5에 나타내었다.

복합 PC 패널의 수직접합은 기존 PC 패널과 유사하게 측면에 형성된 홈 사이에 수직철근으로 보강하고 콘크리트를 채우는 방법을 채택하였다. 수평접합은 Fig. 6(a)와 같이 상하의 복합 PC 패널 사이에 강판을 삽입하고 C형강 플랜지를 볼트로 접합하며 외부에 면하는 쪽에는 웨더 스트립을 덧대

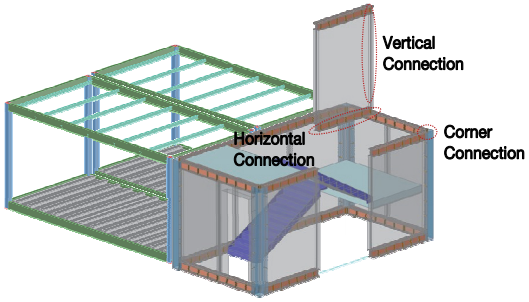
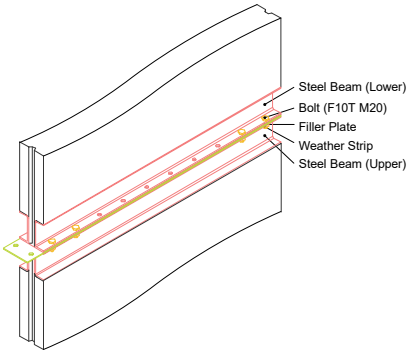
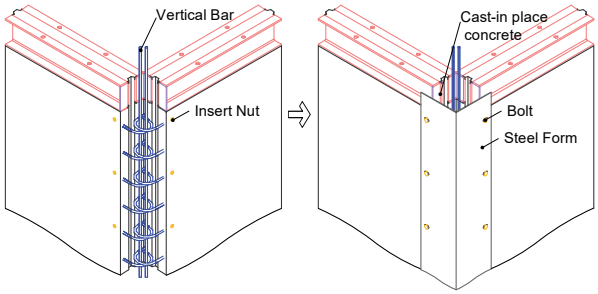


Fig. 5. Connections between hybrid precast concrete panels



(a) Horizontal connection



(b) Corner connection

Fig. 6. Connection details of hybrid precast concrete panel

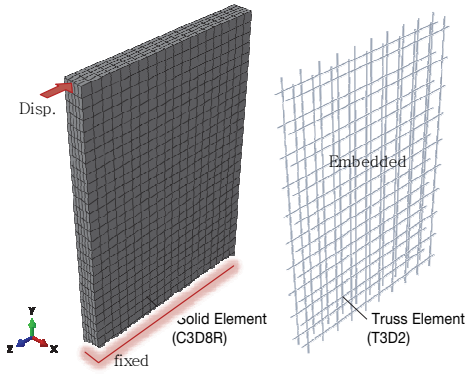
방수에 대비하였다. 코너 접합은 Fig. 6(b)와 같이 ㄱ자 형태의 얇은 강판을 두 패널 사이에 고정하고, 교차되는 180도 갈고리 철근 내부에 수직철근을 꽂아 보강하고, 콘크리트를 현장 타설하여 일체성이 향상될 수 있도록 하였다.

3. 복합 PC 패널의 해석

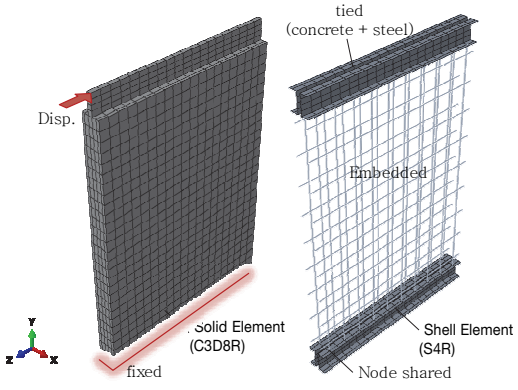
3.1 기본 해석 모델

복합 PC 패널의 상세는 철근 콘크리트 벽체와 동등한 횡력 저항성능이 발휘되도록 해석을 통해 단계별로 개선하였다. 이에 따라 복합 PC 패널의 기본 구성안과 철근 콘크리트 벽체의 횡방향 거동을 비교하기 위해 Abaqus 6.14-1[3]을 이용한 해석을 계획하였다. 휨과 전단의 영향이 동시에 미칠 수 있도록 형상비를 1.5를 적용하여 2000×3000×200mm의 크기를 적용하였고, U형 철근을 제외하고 앞서 서술한 것과 동일한 기하학적 조건을 갖도록 Fig. 7과 같이 모델링하였다.

메쉬를 기본 100×100mm 간격으로 잘랐고, 콘크리트에



(a) RC wall



(b) Hybrid precast concrete panel

Fig. 7. Modeling of RC wall and hybrid PC panel

C3D8R의 솔리드 요소가 적용되었고, C형강에 S4R의 쉘 요소가 사용되었으며, 철근에 T3D2 요소가 사용되었다. C형강과 철근이 용접되는 조건은 절점을 공유시켜 반영하였고, C형강 보와 콘크리트 사이의 접촉 조건은 일체화를 가정하여 타이(tie) 조건이 부여되었다. 철근이 비교적 큰 규모의 콘크리트 내부에 매립되고, 부착 등의 상세 영향을 평가하는 것이 아니라서 임베디드(embedded) 요소로 처리되었다.

3.2 재료 모델

콘크리트의 재료 모델은 Fig. 8(a)과 같이 Saenz[4]가 제안한 압축응력-변형률 관계가 이용되었고, 24MPa의 압축강도에 해당하는 콘크리트의 변형률은 0.002로 가정되었다. 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 Hsu and Mo[5]가 제안한 모델로 식 (1)과 같으며 Fig. 8(b)에 나타내었다.

$$f_{cc}=\frac{E_c\varepsilon}{1(R+R_E-2)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)-(2R-1)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2+R\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^3} \quad (1a)$$

$$f_{ct}=f_{cr}\left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c}\right)^{0.4} \quad (1b)$$

여기서, $R=\frac{R_E(R_\sigma-1)}{(R_\varepsilon-1)^2}-\frac{1}{R_\varepsilon}$

$R_E=E_c/E_o,\ R_\sigma=f_{ck}/\sigma_f,\ R_\varepsilon=\varepsilon_f/\varepsilon_o$

$E_o=f_{ck}/\varepsilon_o$

$f_{cr}=0.31\sqrt{f_{ck}}$, (기타 기호는 Fig. 8 참조)

Fig. 8의 응력도-변형도 관계는 콘크리트에 일축 응력이 작용하는 모델로 다축 응력이 작용하는 비선형 거동을 적절히 모사하기 위해 콘크리트 손상 소성(concrete damaged plasticity) 모델이 사용되었다. 콘크리트 손상 소성 모델은 비상관 소성 흐름 법칙(non-associated flow rule)이 적용되어 항복면(yield surface)과 유동 포텐셜(flow potential)이 같지 않으며, 유동 포텐셜은 팽창각(dilation angle)의 함수로 콘크리트의 팽창각 ψ은 약 15°에서 55°의 값을 가지는 것으로 알려져 있으나, 재료의 내부 마찰각과 동일한 값을 보이는 31°를 해석에 반영하였다.

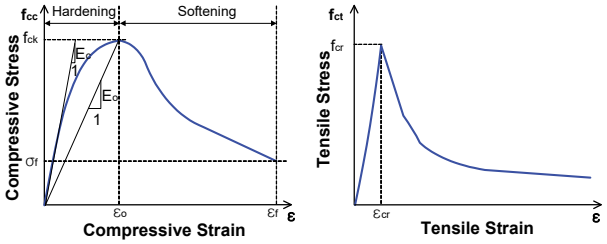
순수한 철근을 인장 시험하면 응력도-변형도 관계는 항복 이후 변형도만 증가하는 현상을 보이게 된다. 그러나 콘크리트에 매립된 철근의 평균 응력도-변형도 곡선은 항복 이후 변형도만 증가하는 현상을 보이지 않는다. 매립된 철근에서 항복강도에 해당하는 응력과 항복 이후 범위에서 평균 응력은 순수한 철근에서의 항복강도와 항복 이후 범위의 평균보다 작은 것으로 밝혀졌다. 매립된 철근의 응력 저감은 철근비뿐 아니라 철근 항복강도와 콘크리트 인장강도와 관련이 있는 것으로 규명되었다. 매립 철근의 항복응력이 저감되는 이유는 인장에 의하여 콘크리트에 균열이 발생하고 균열 발생 지점의 철근에 응력이 집중되기 때문이다. 이러한 현상을 해석에 반영하기 위해 Hsu and Mo[5]가 제안한 식 (2)의 콘크리트에 매립된 철근의 평균 응력-변형률 모델을 사용하였으며 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 9와 같다.

$$\sigma=E_s\varepsilon,\ \sigma\le f_y' \quad (2a)$$

$$\sigma=(0.91-2B)f_y'+(0.02+0.25B)E_s\varepsilon,\ \sigma>f_y' \quad (2b)$$

여기서, $f_y'=(0.93-2B)f_y,\ B=\frac{1}{\rho}\left(\frac{f_{cr}}{f_y}\right)^{1.5}$

C형강은 철근과 달리 콘크리트에 매립되지 않고 접촉 상태로 외부에 노출되어 있다. 따라서 강판을 절곡 가공한 C형강의 재



(a) Compression model (b) Tension model

Fig. 8. Material models of concret

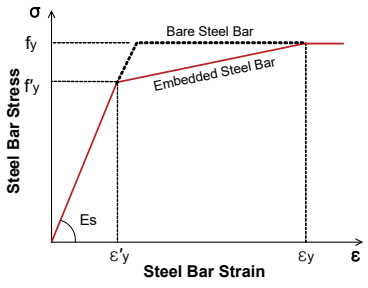


Fig. 9. Material model of steel bar

료 모델은 탄소성(bi-linear)으로 가정하여 항복강도까지 선형 탄성으로 거동하고 인장강도까지 소성 거동은 매우 완만하게 선형으로 상승하는 식 (3)과 같이 반영되었다. 실제 강판의 항복강도와 인장강도는 기준 항복강도와 기준 인장강도보다 크지만 매립된 철근의 응력 저감 효과를 감안하여 C형강의 강종(SS400)에 따른 기준 항복강도와 기준 인장강도를 그대로 적용하였으며 인장강도에 해당하는 변형도는 0.2로 고정하였다.

$$\sigma = E_s \varepsilon,\ \sigma \leq f_y \tag{3a}$$

$$\sigma = E_p \varepsilon,\ f_y < \sigma \leqq f_u \tag{3b}$$

3.3 무보강 복합 PC 패널의 거동

C형강에 어떤 보강도 포함하고 있지 않은 복합 PC 패널과 철근 콘크리트 벽체의 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 기본형 복합 PC 패널의 초기강성은 철근 콘크리트 벽체의 초기강성보다 다소 떨어지며, 항복하는 시점도 빠르다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 11에 나타낸 변형된 모델의 응력분포로부터 하부 C형강의 플랜지 좌굴로 인한 것으로 인장을 받는 위치에서 플랜지가 상부로 들리고, 압축을 받는 위치에서 뒤틀리고 눌리는 현상을 보이고 있다. 한편, 철근 콘크리트 벽체의 경우 전단과 휨이 혼합된 거동을 보이는 반면 기본형 복합 PC 패널의 내력은 계속해서 증가하는 휨 거동이 우세하게 나타나고 있는데 이것은 콘크리트와 C형강 사이에 타이(tie) 조건을 부여한 것에서 비롯된 것으로 추정된다.

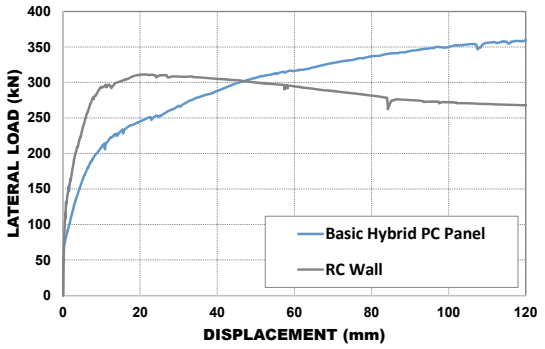
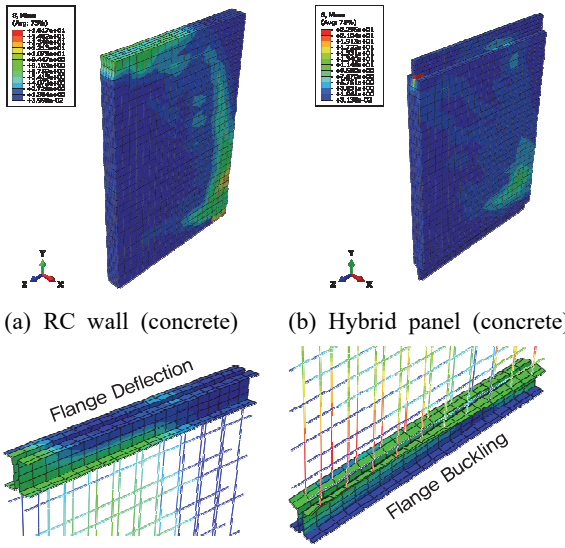


Fig. 10. Analysis results on the load versus displacement relation



(a) RC wall (concrete) (b) Hybrid panel (concrete)

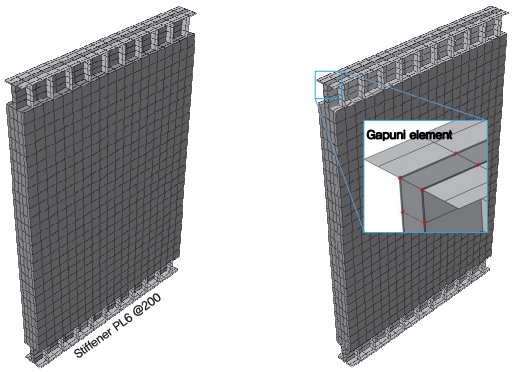
(c) C-shaped steel beam

Fig. 11. Stresses distribution of RC wall and hybrid PC panel

3.4 C형강의 스티프너 보강

C형강의 플랜지 좌굴 현상을 억제하기 위해 수직철근과 동일한 200mm 간격으로 두께 6mm인 SS400 스티프너로 C형강을 보강하는 방안을 도출하여 이에 대한 모델링을 실시하였다. 한편, C형강과 콘크리트 사이의 현실적 접촉 조건을 부여하기 위한 방법으로 갭(gapuni) 요소를 사용한 해석 모델도 마련하였다. 갭 요소를 적용하기 위해 C형강의 두께 중심을 기준으로 기하학적 모델을 구축하여 C형강과 콘크리트 사이에 약 3mm의 공간을 두었고, 서로 마주하는 노드를 갭 요소로 연결하였다. 강재와 콘크리트 사이의 마찰계수는 일반적으로 0.45로 알려져 있지만, 이 해석에서 메쉬의 크기가 큰 것을 고려하여 갭 요소의 마찰 계수를 0.47로 입력하였다. 스티프너로 보강한 복합 PC 패널과 갭 요소로 현실성을 고려한 두 가지 모델링을 Fig. 12에 나타내었다.

해석 결과 스티프너로 보강된 경우의 최대내력은 395kN으로 철근 콘크리트 벽체 모델의 최대내력인 311kN보다 약 27%



(a) Reinforced with stiffener (b) Refined with gapuni elem

Fig. 12. Modeling of hybrid PC panel with stiffeners

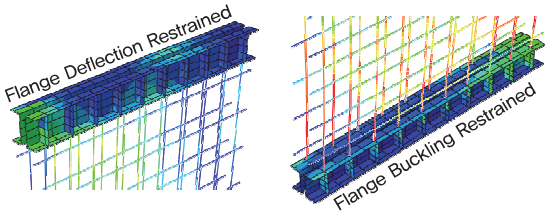


Fig. 13. Stresses distribution of model with stiffeners

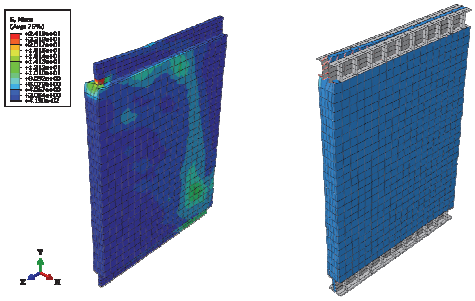


Fig. 14. Deformed shape of model with gap elements

증가하였으며, 초기강성도 철근 콘크리트 벽체 모델과 유사한 값을 보였다. 플랜지 좌굴을 보였던 C형강은 Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 최대내력 및 0.04rad의 횡변위에 도달할 때까지 국부 좌굴은 나타나지 않았으며 철근 콘크리트 벽체와 유사한 거동을 보였다.

그러나 갭 요소를 통해 이질 재료 사이의 접촉 상태를 반영한 모델의 해석 결과 타이 조건이 부여된 경우 대비하여 큰 거동 차이를 보였다. 가력 초기 단계부터 갭 요소의 신장으로 하중이 떨어졌다가 다시 상승하는 하중-변위 관계에서 초기강성도 스티프너가 없는 모델과 유사할 정도로 작았고, Fig. 14와 같이 가력 지점의 콘크리트가 C형강과 분리되어 회전하는 파괴 양상이 확인되었다.

3.5 C형강의 스티프너 보강 및 링크 연결

비교적 메쉬가 크게 구성되어 C형강과 콘크리트 사이의 접촉을 정확히 모사하기 어려웠다는 점을 감안하더라도 복합 PC 패널의 횡력저항 거동을 지배하는 요인은 C형강과 콘크리트의 두 이질 재료의 일체 거동임을 확인할 수 있었다. 이 점을 고려하여 쌍으로 배치된 C형강의 웨브 사이를 연결하는 링크(link) 강판을 용접하여 전단 연결재의 역할을 할 수 있도록 상세를 개선하였다. 또한 C형강과 콘크리트 사이에 작은 공간을 두어 서로 접촉되지 않도록 하여 링크로만 합성 거동에 기여할 수 있도록 고려하였다. 양측의 작은 공간을 제외

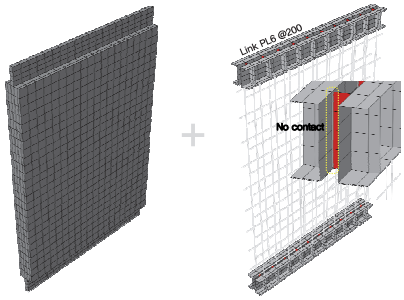


Fig. 15. Modeling of hybrid PC panel with stiffeners

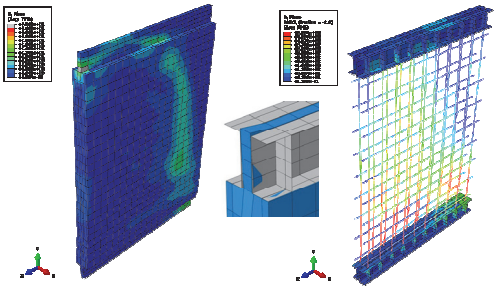


Fig. 16. Stresses distribution of model with stiffeners and links

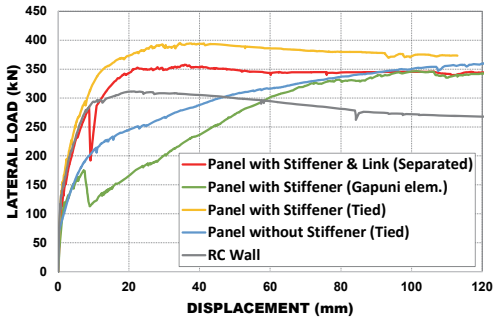


Fig. 17. Analysis results on the load versus displacement relation

하고 콘크리트와 겹치는 링크의 일부분은 임베디드 요소로 Fig. 15와 같이 모델링하였다.

해석 결과 스티프너와 링크로 보강된 복합 PC 패널은 최대내력 이후 완만히 감소하는 거동을 보였다. 초기강성은 철근 콘크리트 벽체와 거의 동일하며, 최대내력은 약 341kN으로 철근 콘크리트 벽체보다 약 10% 상승하여 개선 효과가 뚜렷하였다. 한편, Fig. 16에 나타낸 응력과 변형 상태에서 가력지점에서 첫 번째 링크 사이에서 콘크리트의 파괴가 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 현상은 콘크리트 부분에 직접 가력하는 조건에 의한 것으로 첫 번째 구간에만 국한되어 나타났다. 국부적인 콘크리트의 파괴로 인해 하중-변위 관계에서도 일시적으로 하중이 감소하였다가 다시 회복하는 거동

은 수렴과 관련한 증분 변위의 1% 제한 문제로 의심되었다.

지금까지 5가지 모델의 해석 결과로부터 얻은 하중-변위 관계를 Fig. 17에 함께 정리하였다. C형강과 콘크리트가 일체 거동하는 경우라면 스티프너 보강만으로 철근 콘크리트 벽체보다 우수한 최고의 성능을 확보할 수 있으나, 이질 재료 사이 접촉 상태를 갭 요소를 통해 보수적으로 모델링한 경우 최하의 성능을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 C형강과 콘크리트 사이의 일체성이 개선되면 전반적인 성능 향상으로 이어지며, 링크로 연결하는 것이 중요함을 알 수 있다.

4. 복합 PC 패널의 볼트 접합부 해석

4.1 볼트 접합부 모델링

3장의 해석을 통해 C형강을 스티프너로 보강하고 링크로 연결하는 상세 개선을 이루었다. 개선된 상세를 갖는 복합 PC 패널의 적정 볼트 접합 방법을 찾기 위해 F10T M20 볼트의 200mm 간격 체결을 기본으로 설정하였다. 볼트 접합부의 해석 모델은 Fig. 18과 같이 스티프너 사이마다 1개의 볼트로 접합된 경우와 2개의 볼트로 접합된 경우로 구분하였다. 볼트 접합은 상·하부 C형강 사이에 10mm 길판을 삽입하고 이루어지기 때문에 비교를 위한 콘크리트 벽체는 2000×3210×200mm으로 모델링되었다. 철근을 제외하고 콘크리트, C형강, 길판, 볼트는 C3D8R의 솔리드 요소가 적용되었고, 와셔는 침투 현상이 없어 모델링에서 제외시켰다[6]. 재료 모델은 3.2에 제시한 해당 재료의 모델이 동일하게 적용되었다.

각각의 볼트에는 조임력으로 F10T M20의 표준볼트장력인 180,400N을 프리텐션으로 입력하였다. 철근과 링크는 콘크리트 내부에 매립되는 임베디드 요소로 처리되었다. 콘크리트와 C형강, C형강과 길판, 볼트와 C형강 및 길판 등은 일체화된 것이 아니어서 선행연구[7]를 참고하여 접촉 조건을 입력하였다. 콘크리트와 강재 사이의 수평 마찰계수는 0.45로, 강재와 강재 사이의 수평 마찰계수는 0.30으로 입력하였으며, 수직 방향은 하드 컨택 조건이 부여되었다.

밑면 고정 조건은 수직철근의 간격과 매립된 링크 간격 등을 고려하여 200mm 간격으로 스티프너를 따라 고정된 것으로 가정하였고, 콘크리트 벽체도 이와 동일하게 고정 조건을 설정하였다. 요소 개수에 따른 장시간의 해석을 피하기 위해 복합 PC 패널은 1/2만 모델링하여 대칭 조건으로 x축의 변위는 고정되었다.

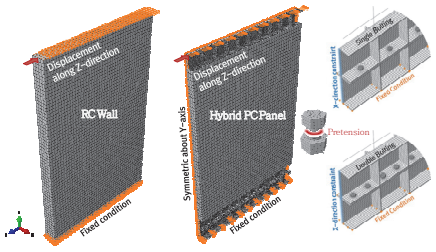


Fig. 18. Modeling of RC wall and bolt connections

4.2 볼트 접합부 해석 결과

해석 결과 2개의 볼트로 접합된 경우 콘크리트 벽체의 횡방향 거동과 유사한 성능을 보이는 반면 1개의 볼트로 접합된 경우는

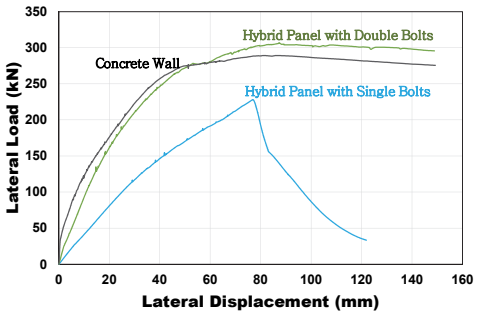


Fig. 19. Analysis results on the load versus displacement relation

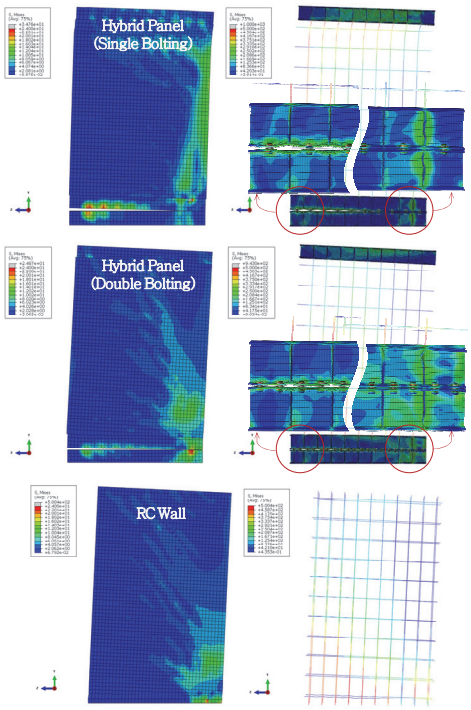


Fig. 20. Deformed shape and stresses distribution

볼트와 스티프너의 지레 거동에 의해 콘크리트 벽체에 비해 강도와 강성이 크게 떨어지는 거동을 Fig. 19에서 확인할 수 있다.

Fig. 20에서 1개의 볼트로 접합된 경우 횡력이 작용하여 인장을 받는 좌측 최외연 볼트 구멍 부위에 응력이 집중되고 이 부분의 철근도 항복하기 때문에 상부 보와 연결된 수직철근이 가력방향으로 꺾이는 현상을 보이고 있다. 이에 따라 콘크리트의 우측 가장자리 부분에서 전체적으로 응력이 상승하고, 하부 보의 우측 최외연 스티프너에 압축력이 집중되어 좌굴하는 파괴 특성을 보이고 있다. 반면 2개의 볼트로 접합된 경우 150mm의 횡변위가 발생한 시점에서도 인장을 받는 좌측 최외연 볼트 와 스티프너 사이의 지레 거동이 상대적으로 작고, 인장 측 수직철근도 항복하지 않는다. 또한 압축을 받는 우측 최외연 스티프너가 좌굴해도 응력의 분배를 통해 다음 스티프너가 압축에 저항하는 거동을 보이고 있다.

5. 결 론

이 연구에서 중고층 모듈러 건축물의 코어를 건식으로 시공이 가능한 복합 PC 패널을 개발하여 그 성능을 해석적으로 비교하여 개선 방향을 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모듈의 외장 마감 정도에 따라 콘크리트 코어 시공과 모듈 시공의 순서가 결정되어야 하며, 모듈의 오염과 파손을 막기 위해 코어는 건식 시공이 바람직하다.

(2) 복합 PC 패널이 철근 콘크리트 벽체와 동등한 횡력저항성능을 갖기 위해 상·하부 보에 200mm 간격으로 스티프너와 링크로 보강될 필요가 있다.

(3) 스티프너 사이마다 2개의 F10T M20 고력 볼트로 접합하면 복합 PC 패널의 수평접합부는 철근 콘크리트 벽체와 동등한 횡력저항성능을 발휘할 수 있다.

(4) 복합 PC 패널의 수평접합부의 횡력저항성능을 높이기 위해 볼트와 스티프너 사이의 지레 거동을 최소화할 필요가 있으며, 최소화 방안으로 플레이트 와셔 사용을 고려할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 주거환경연구사업인 모듈러 건축 중고층화 및 생산성 향상 기술개발(17RERP-B082884-04)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] Lawson, M., Ogden, R., and Goodier, C.I. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, UK.

[2] Mills, S., Grove, D., and Egan, M. (2015) Breaking the Pre-Fabricated Ceiling: Challenging the Limits for Modular High-Rise, *Proceedings of CTBUH 2015 International Conference*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, USA, pp.416-425.

[3] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Analysis User's Guide, Ver. 6.14*, DSS, USA.

[4] Saenz, L.P. (1964) Discussion of 'Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete' by Desayi, and Krishnan, *Journal of American Concrete Institute*, American Concrete Institute, Vol.61, pp.1229-1235.

[5] Hsu, T.T.C., and Mo, Y.-L. (2010) *Unified Theory of Concrete Structures* (2nd Ed.), John Wiley & Sons, USA.

[6] 신경재, 임보혁, 이수헌, 최성모(2011) 웨브를 볼트로 접합한 보-기둥 접합부의 유한요소해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제3호, pp.305-316.
Shin, K.J., Lim, B.H., Lee, S.H., and Choi, S.M. (2011) FEA of Beam-Column Connection with Bolted Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.3, pp.305-316 (in Korean).

[7] 양재근, 백민창(2013) 고력볼트로 체결된 T-Stub의 지레작용력 및 부재 접촉력 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.409-419.
Yang, J.G., and Baek, M.C. (2013) Prediction Models for the Prying Action Force and Contact Force of a T-Stub Fastened by High-Strength Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.409-419 (in Korean).

요 약 : 모듈러 건축물을 중고층화하기 위해 횡력저항시스템은 반드시 필요한 구조 요소로 10~20층 규모에서 콘크리트 코어는 가장 전형적인 횡력저항시스템으로 알려져 있다. 습식 공법인 콘크리트 코어 공사는 모듈의 오염과 파손 가능성으로 모듈 적층과의 동시 작업이 곤란하다. 이에 모듈 적층과 콘크리트 코어의 동시 시공이 가능한 복합 PC 패널 공법을 개발하였다. 복합 PC 패널은 일정 간격을 두고 웨브가 마주보는 한 쌍의 C형강을 콘크리트 벽체의 상부와 하부에 결합한 구조 부재로 볼트로 접합하여 적층하는 건식 공법으로 콘크리트 코어를 구축할 수 있다. 이 연구에서는 복합 PC 패널이 콘크리트 벽체와 동등한 성능을 갖도록 해석을 통해 상세 개선 과정을 제시하였다.

핵심용어 : 모듈러 건축, 콘크리트 코어 시스템, 건식 공법, 복합 PC 패널, 횡력저항시스템