

프리캐스트 콘크리트에 의해 피복된 콘크리트충전 강관기둥의 편심압축실험

이호준¹ · 박홍근^{2*} · 김성배³ · 박성순⁴

¹박사과정, 서울대학교, 건축학과 ²교수, 서울대학교, 건축학과 ³소장, ㈜더나은구조엔지니어링 ⁴팀장, 신세계건설(주)

Eccentric Axial Load Test for Concrete-Filled Tubular Columns Encased with Precast Concrete

Lee, Ho Jun¹, Park, Hong Gun^{2*}, Kim, Sung Bae³, Park, Sung Soon⁴

¹Graduate Student, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

²Professor, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

³Manager, The Naeun Structural Engineering Co. Ltd, Seoul, 150-105, Korea

⁴General Manager, SHINSEGAE E&C, Seoul, 100-391, Korea

Abstract - In this paper, concrete-filled steel tubular columns encased with precast reinforced concrete were studied. Four eccentrically loaded columns and a concentrically loaded column were tested to investigate the axial load-carrying capacity. The test parameters were the use of fiber reinforcement for cover concrete, eccentricity, column length, and lateral reinforcement. The maximum axial loads of the specimens agreed with the nominal strengths predicted by KBC 2009. However, in some specimens, the load carrying capacity quickly decreased after the peak strength due to spalling of the cover concrete.

Keywords - Composite column, Concrete-filled tube, Cover concrete, Precast concrete, Hollow PC

1. 서론

대형 마켓, 물류센터 등 큰 경간과 높은 층고를 갖는 건물의 수요가 증가하면서 단면과 길이가 큰 대형기둥들이 적용되고 있다. 대형기둥을 기존의 RC 공법으로 시공할 경우, 현장 철근배근 작업과 거푸집 공사가 복잡하여 공기가 길어지고 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 한편 PC 공법을 적용할 경우, 대형기둥이므로 제작 및 운반에 과다한 비용이 지출되며 현장에서의 양중 및 이음 작업에도 어려움이 발생한다.

중공 PC 기둥을 적용할 경우, 대형기둥의 양중무게를 줄이고, 현장에서 별도의 철근배근 및 거푸집 작업 없이 내부 콘크리트를 타설할 수 있어 시공이 수월하다. 그러나 일반적인 중공 PC 기둥은 내부 크로스타이 설치가 어려워서 제작성이 매우 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 기존 중공 PC 공법의 단점을 보완하여 얇은 각형강관을 적용한 중공 PC 기둥을 개발하고자 한다(이하 LW PC 합성기둥, Light Weight Precast Concrete composite column). Fig. 1과 같이 강관 외부의 콘크리트는 공장에서 PC로 제작하고 강관 내부는 현장타설 콘크리트를 채우게 된다. 강관의 사용으로 인해 크로스타이가 필요 없고, 강관이 거푸집 역할을 하기 때문에 제작성을 크게 향상시킬 수 있다.

내부콘크리트가 채워진 LW PC 합성기둥의 구조형식은 콘크리트피복 CFT기둥(이하 피복 CFT기둥)과 동일하다. 국내에서 피복 CFT기둥은 주로 탑다운 공사를 위한 지하기둥으로 사용되고 있으며, 강관기둥 설치 후 현장에서 내부콘크리트를 채우고 공사가 진행되는 과정에서 구조성능

Note.-Discussion open until August 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 26, 2013; revised November 20, 2013; approved on January 2, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-7055 Fax. +82-2-882-7053

E-mail. parkhg@snu.ac.kr

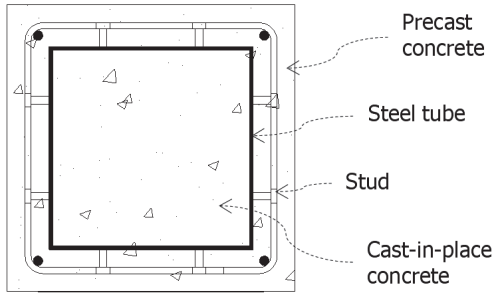


Fig. 1. Cross section of LW PC composite column

과 내화성능을 증진시키는 목적으로 피복콘크리트가 더해진다. LW PC 합성기둥의 주요 목적은 대형기둥의 중공화를 통한 대형PC기둥의 경량화이며, 따라서 상대적으로 세장단면을 사용하며, 피복콘크리트에 의한 추가적인 강성, 내력, 내화성 등의 증진이 기대된다.

피복 CFT부재의 구조적인 특징은 선행연구들에 의해 일반적인 CFT기둥보다는 SRC기둥과 비슷하다고 알려져 있다^[1]. Matsui *et al.*^[2]은 다양한 형식의 강관기둥에 대하여 강관의 판폭두께비를 변수로 하여 중심압축실험을 수행하였고, Yamashita *et al.*^[3]은 고인성 시멘트 복합재료를 적용한 피복형 강관 보에 대한 휨실험을 수행하였다. 그러나 피복 CFT기둥에 관한 연구는 국내에서는 거의 전무한 상태이며 일본에서도 실험사례가 제한적이어서 아직까지 그 구조성능이 충분히 밝혀지지 않았다^[4]. 또한 피복 CFT기둥과 유사한 형식으로 SPC합성기둥에 대한 연구^{[5],[6]}가 국내 및 일본에서 수행된 바 있지만, 피복PC가 일체화되지 않았다는 점이 일반적인 피복 CFT기둥과는 다르다.

일본건축학회의 철골철근콘크리트 구조계산기준^[7]에서는 실제 사용빈도를 고려하여 콘크리트피복 CFT기둥의 피복두께를 전체단면 크기의 20%(이때 중공률은 약 36%)로 표준화하였으며 대부분의 실험체들은 이와 유사한 비율로 설계되었다. 그러나 LW PC 합성기둥은 주목적이 지상 PC기둥의 경량화이므로 피복PC의 두께를 가능한 한 얇게 설계하여 높은 중공률을 확보하는 것이 중요하다. 피복PC가 두꺼울 경우에는 내부 강관의 국부좌굴을 충분히 방지하여 일반 SRC와 유사한 거동을 기대할 수 있으나, 피복PC의 얇은 두께와 매끄러운 강관 표면으로 인한 피복PC의 조기탈락은 기둥의 강도발현에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 LW PC 합성기둥 피복PC의 구조성능은 실험을 통해 검증될 필요가 있다.

본 연구에서는 비교적 얇은 피복PC 두께를 가진 콘크리

트피복 CFT기둥의 구조성능을 검증하기 위하여 편심압축 실험체 4개와 중심압축실험체 1개를 제작하여 압축실험을 수행하고 LW PC 합성기둥의 하중재하능력, 변형능력, 피복PC의 부착성능 등을 검증하였다.

2. 실험 계획

Table 1과 Fig. 2는 LW PC 합성기둥 실험체의 실험변수와 실험체 상세를 보여준다. 편심압축실험체인 C1, C2, C3, C4의 기둥단면은 480mm×480mm이며, 중심압축실험체인 C5는 UTM의 용량을 고려하여 기둥단면을 380mm×380mm로 축소하였다. 강관두께 6mm 및 PC두께 70mm는 모든 실험체에서 동일하다. PC두께 70mm는 KBC 2009 기준에 따라 철근 배근과 콘크리트 피복 위해 필요한 최소한의 두께로서 산정하였다. 이 때 편심압축실험체의 경우 중공률이 50%이고 중심압축실험체는 중공률이 40%이다. 편심압축실험체에서는 단면크기 340mm×340mm인 각형강관을, 중심압축실험체에서는 단면크기 240mm×240mm인 각형강관을 각각 용접조립으로 제작하였다.

본 연구에서의 주요 실험변수는 피복PC에 강섬유 사용 여부, 편심거리, 유효길이(하중점간 순거리), 그리고 횡보강이다. 특히 C2, C3, C5에 대해서는 LW PC 합성기둥의 기본 상세를 적용하였다. C2는 큰 편심거리를 가진 실험체, C3는 장주실험체, C5는 중심압축실험체이다. 기본 상세에서는 SD400 철근 4-D16을 단면의 모서리에 종방향으로 배근하고, 횡철근으로 SD400 철근 D10을 120mm(=기둥 단면 폭의 1/4) 간격으로 설치하였다. 내부에 강관이 있어서 횡철근의 갈고리 정착이 불가능하였으며 90도 후크 겹침이음을 사용하였다. 강관과 피복PC 사이의 부착성을 개선하기 위하여 스티드 8개를 240mm 수직 간격으로 배치하였다. 또한 피복PC의 균열과 조기탈락을 방지하기 위하여 SD400 철근 8-D13을 수직방향으로 추가로 배근하고, 스티드와 태그용접하는 특별 상세를 적용하였다(Fig. 2 (a)).

C1은 피복PC의 구조성능을 증진시키기 위하여 변형능력과 인성이 우수한 강섬유 콘크리트 사용하였다. 얇은 피복부에서 콘크리트의 유동성을 고려하여 강섬유 체적비를 0.8% 수준으로 제한하였다. C1은 피복PC에 강섬유콘크리트를 사용한 것을 제외하면 기본 상세와 동일하며 기둥의 유효길이는 2,880mm이다. 편심거리는 60mm로 설계하였으며 편심율은 0.125이다.

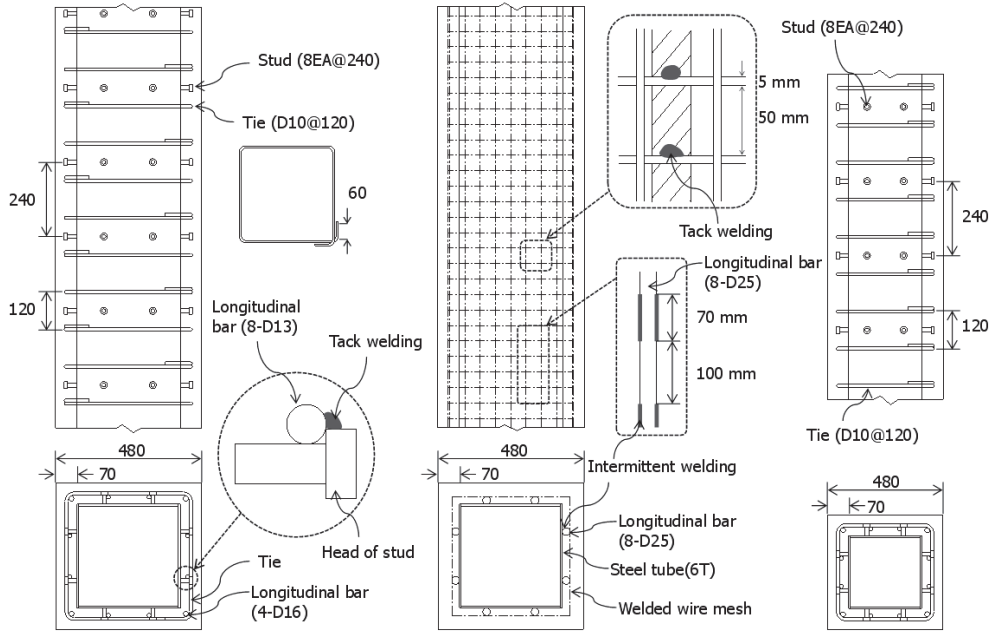


Fig. 2. Details of specimens

Table 1. Properties of test specimens

Specimens		C1	C2	C3	C4	C5
Dimensions of cross section, $D \times D$ (mm \times mm)		480 \times 480				380 \times 380
Area ratio of filled concrete (%)		50				40
Eccentricity, e /Eccentricity ratio (mm, mm/mm)		60 / 0.125	180 / 0.375	60 / 0.125		-
Effective length, L_e /Slenderness ratio(1) (mm, mm/mm)		2880 / 20.8	2880 / 20.7	4320 / 31.0	2880 / 20.7	1500 / -
Cover thickness (mm)		70				
Volumetric ratio of fiber reinforcement (%)		0.8	-			
Compressive strength of PC / filled concrete (MPa)		28.7 / 21.9	37.5 / 21.1			38.7 / 21.9
Steel tube	Cross section/Thickness (mm \times mm, mm)	340 \times 340 / 6				240 \times 240 / 6
	Area ratio/Width-to-thickness ratio (% , mm/mm)	3.5 / 54.7				3.9 / 38.0
	Yield strength/Elongation (MPa, %)	409 / 18				
Longitudinal re-bar	Arrangement	4-D16, 8-D13			8-D25	4-D16, 8-D13
	Area ratio(%)	0.9			1.8	1.5
	Yield strength/Elongation (MPa, %)	489/16, 518/15			308 / 24	489/16, 518/15
Tie	Arrangement	D10@120			WWM(2)	D10@120
	Area ratio(%)	0.85			0.56	0.85
	Yield strength/Elongation (MPa, %)	443 /18			-	443 /18
Stud		8- Φ 13@240			-	8- Φ 13@240

(1) Slenderness ratio $\lambda = KL_e/r$, where effective length factor $K=1$ for C1, C2, C3, C4 and radius of gyration

$$r = \sqrt{(0.2E_cI_c + E_sI_s)/(0.2E_cA_c + E_sA_s)} \text{ (mm, KBC 2009)}$$

(2) Welded Wire Mesh, grid size of 50mm \times 50mm, diameter of 5mm

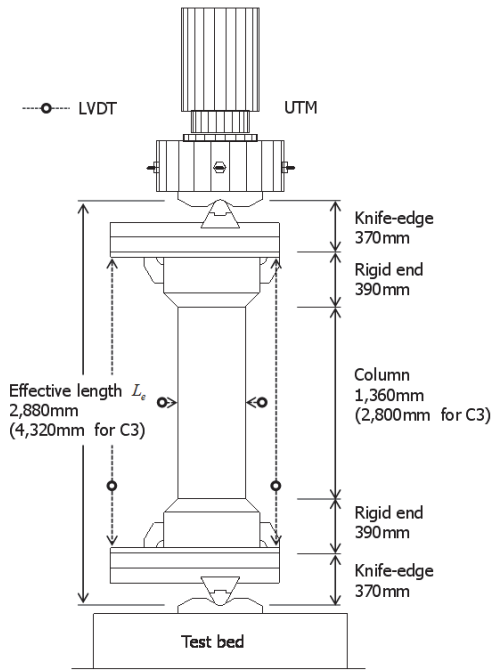


Fig. 3. Test setup for eccentrically loaded specimens

C2는 기본 상세를 적용하였으며 편심율을 0.375로 하여 다른 편심압축실험체보다 편심거리(=180mm)를 증가시켰다. 기둥의 유효길이는 2,880mm이다. C3도 기본 상세를 적용하였으며 세장효과의 영향을 고려하기 위해 기둥 실험체의 유효길이를 4,320mm로 증가시켰고, 이 때 세장비가 약 31.0으로서 세장기둥으로 분류된다($\lambda \geq 22$, KCI 2012). C3의 편심거리는 60mm이다.

C4는 얇은 PC두께를 고려하고 제작의 편의를 위해 일반적으로 사용하는 횡철근 대신에 용접철망(직경 5mm, 격자 50mm×50mm)을 적용하였다. 이를 위해 수직철근 8-D25를 강관에 100mm 간격으로 단속용접하고 철근 둘레로 용접철망 감싸는 특별상세를 사용하였다. 수직철근으로 SD 300 철근($f_y = 308\text{MPa}$)을 사용하였다. 기둥의 유효길이는 2,880mm이고 편심거리는 60mm이다.

C5는 중심압축실험체이다. 기둥단면을 편심압축실험체보다 축소하였지만 기본 상세와 거의 동일하게 설계하였다. 피복PC의 두께는 70mm이며, 종방향 철근의 배근 또한 기본 상세와 동일하게 설계하였고, 횡철근 및 전단연결재도 기본 상세와 동일한 간격을 적용하였다. C5의 유효길이는 1,500mm이다.

Fig. 3는 편심압축실험을 위한 셋팅을 보여준다. 최대 가력하중 10,000kN 용량의 UTM을 사용하였으며 0.01mm

/sec의 속도로 가력하였다. 기둥 실험체의 상하부는 기둥 단면보다 강성이 큰 보강부로 설계하여 기둥부에서 응력집중이 발생하지 않도록 하였으며, 보강부에는 전단연결재를 충분히 배치하여 강관과 콘크리트가 일체화되도록 하였다. 실험체 양단에서는 두께 40mm의 엔드플레이트를 강제하는 개선용접, 철근과는 원주용접을 하였다.

편심압축실험체의 경우 엔드플레이트를 나이프엣지(knife-edge)와 볼트접합하여 가력점과 지지점이 힌지조건이 되도록 하였다^[8]. 중심압축실험체는 지그 없이 UTM으로 직접 가력하였다. C1, C2, C4의 기둥부(Fig. 3에서 Column) 길이는 1,360mm이고 C3의 기둥부 길이는 2,800mm이지만 위아래 보강부와 지그를 고려한 유효길이 L_e 는 각각 2,880mm, 4,320mm이다. C5의 기둥부 길이는 1,050mm이며 보강부를 포함한 유효길이 L_e 는 1,500mm이다. 세장효과 고려시, 유효길이계수가 편심압축실험체의 경우 이론값이 $K = 0.9$ 를 상회하기 때문에 편의상 $K = 1$ 로 가정하였으며 중심압축실험체는 단주이므로 순수압축강도만을 평가하였다.

LVDT 변위계(Fig. 3)는 기둥 상하부의 엔드플레이트 네 모서리에 수직방향으로 설치하였으며, 수평 변위계를 통해 중앙부의 처짐을 계측하였다. 또한, 모든 실험체에서 변형률 게이지를 이용하여 철근 및 강재의 변형률을 계측하였다.

3. 실험 결과

3.1. 파괴양상 및 하중-변위 관계

Fig. 4와 Fig. 5는 LW PC 합성기둥의 파괴 양상과 하중-변위 관계를 보여준다. 실험은 하중이 최대강도의 70% 수준으로 감소될 때까지 진행하였으며 Fig. 4는 실험이 종료하였을 때의 사진이다. C1과 C2는 각각 기둥부의 하단과 상단에서 파괴하였으며 C3, C4, C5는 기둥부 중앙부근에서 파괴가 발생하였다. 실험시 기둥부 콘크리트를 비닐 랩으로 감쌌기 때문에 피복콘크리트의 탈락을 완전히 나타내지는 못하였다. Fig. 5에서 세로 축의 하중은 UTM의 수직 하중을 그대로 사용하였으며, 가로 축의 변위는 종방향 LVDT로부터 구한 가력점의 축변위이다. Fig 5에는 하중-변위 관계와 함께 주요한 손상 및 파괴모드가 나타나 있다.

모든 편심압축실험체에서는 압축대 피복PC가 탈락하고 이후 철근 및 강관의 국부좌굴이 발생하면서면서 파괴되었다. 강섬유 콘크리트를 사용한 C1은 압축대에서 수직균열

발생(하중 5,500kN 부근) 후에도 축력이 증가하였다. 다른 실험체와 다르게 최대강도($P_u = 6,844\text{kN}$) 도달 후에도 피복PC의 탈락이 제한적이었으며(Fig. 6) 급격한 하중저하 없이 연성변형을 하였다. 실험 종료 후 해체과정에서는 내부 강관 및 철근의 국부좌굴이 발견되었다.

C1을 제외한 모든 실험체는 피복PC의 수직균열 발생과 동시에 최대강도에 도달하고 피복PC가 탈락하면서 파괴되는 양상을 보였다. 편심거리가 큰 C2에서는 최대 강도 전에 인장부 피복콘크리트에서 균열이 발생하였다(하중 약 2,000kN). 최대 강도($P_u = 4,195\text{kN}$) 후의 하중 하락폭은 크지 않았으며 이는 편심율이 커서 파괴 시 축력에 대한 피복PC의 기여

도가 편심율이 작은 다른 시험체에 비해 작았기 때문으로 판단된다. 실험 종료 후 해체과정에서 내부 철근 및 강관의 국부좌굴이 발견되었다(Fig. 6). C3도 편심거리와 유효길이만 다를 뿐 기본 상세를 가진 실험체이기 때문에 최종 파괴양상은 C2와 유사했다. 그러나 축력에 대한 피복PC의 기여도가 커서 C2보다 최대강도($P_u = 6,883\text{kN}$) 후의 하중 하락폭이 컸다.

C4도 같은 편심율을 가진 C3과 마찬가지로 최대강도($P_u = 7674\text{kN}$) 후에 하중이 급격히 감소였으며 피복PC의 균열과 탈락이 보다 광범위하게 발생하였다. 실험 종료 후 해체과정에서 용접철망의 용접파단과 국부좌굴이 발견되었

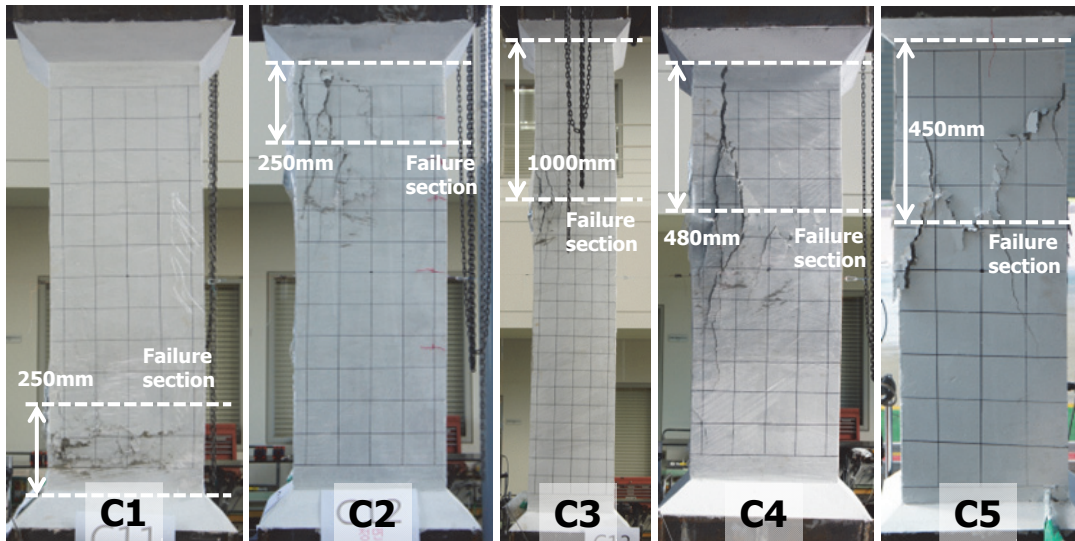


Fig. 4. Failure modes of specimens after the end of testing

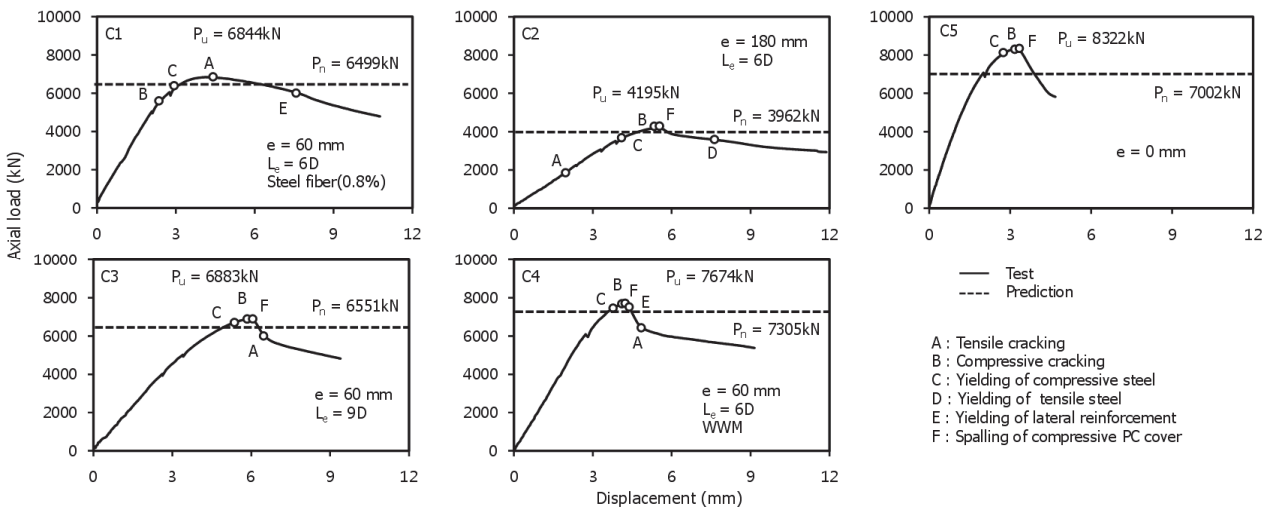


Fig. 5. Axial load-displacement relationship of specimens



Fig. 6. Breakup of specimens

다(Fig. 6).

중심압축실험체인 C5도 일부 편심압축실험체와 유사하게 최대강도($P_u = 8,322\text{kN}$) 후 하중이 급격하게 감소하였다. 편심압축실험체보다 기둥단면 중 피복PC의 면적이 차지하는 비율이 컸고 전단면이 축력에 기여하고 있었기 때문에 파괴도 취성적으로 발생하였다. 실험 종료 후 강관 및 철근의 국부좌굴이 뚜렷하지 않았다. 이는 강관의 판폭두께비가 40으로 편심압축실험체의 56.7보다 작고, 상대적으로 기여도가 큰 피복PC가 압과하면서 실험이 일찍 종료하여 실험체가 큰 축 변형을 경험하지 못했기 때문으로 보여진다.

Fig. 5에 나타나 있듯이 모든 실험체는 설계기준에 따른 예측강도를 초과하였다. 예측강도의 계산은 4.1에서 설명한다.

3.2. 변형능력

Fig. 7은 편심압축실험체 C1, C2, C3, C4의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. 가로축의 평균 곡률은 $\phi = (\Delta_t - \Delta_c) / (lb)$ 이며 Δ_t , Δ_c 는 각각 Fig. 3의 인장부와 압축부에서의 수직변위계의 측정결과이다. l 은 수직변위계의 측정거리로

서 C1, C2, C4에서는 2,060mm이며 C3에서는 3,500mm이다. b 는 엔드플레이트 폭으로서 1,200mm이다. 곡률 계산시 기둥 중앙부에서의 강재 또는 철근의 변형률 값을 이용하는 것이 정확하지만 본 실험에서는 최대강도 도달 후 피복PC의 탈락과 동시에 강재 및 철근의 국부좌굴이 발생하여 정확한 변형률 값을 얻지 못하였다. 모멘트-곡률 관계는 실험체의 변형능력을 보기 위한 것이기 때문에 최대강도 후의 거동이 중요하다. 따라서 근사적인 방법인 하지만 LVDT 변위계로 측정한 전체 변위로부터 실험체의 곡률을 계산하였다. 세로축의 모멘트는 2차효과를 고려하여 기둥 중앙부 단면에 실제로 작용한 모멘트로서 식 (1)과 같다.

$$M = P(e + \Delta) \tag{1}$$

식 (1)에서 M 은 기둥 중앙부에 작용한 모멘트, P 는 하중, e 는 초기편심거리, Δ 는 기둥중앙부에서의 횡변위이다. 편심율이 가장 큰 C2는 기둥 중앙부에서의 최대모멘트가 789kN·m로서 편심압축실험체 중 가장 컸으며, 강섬유 콘크리트를 적용한 C1은 최대평균곡률이 0.02297 1/m로 가장 컸다. 인장균열의 발생으로 C2의 강성은 초기부터 감소함을 알 수 있다. 각 실험체의 변형능력을 평가하기 위한 곡률의 연성도는 다음과 같이 계산하였다.

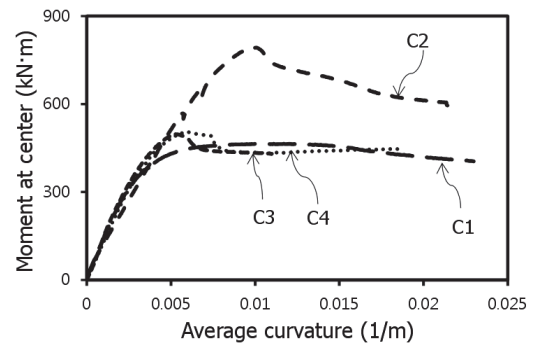


Fig. 7. Moment-curvature relationship

Table 2. Deformation capacity and ductility

Specimen	ϕ_y , 1/m	ϕ_u , 1/m	μ , m/m
C1	0.00382	0.02024	5.30
C2	0.00817	0.01844	2.26
C3	0.00375	0.00929	2.48
C4	0.00423	0.01403	3.32

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2)$$

식 (2)에서 항복곡률 ϕ_y 는 원점과 최대하중의 75%를 잇는 할선강성이 최대하중에 도달했을 때에 대응하는 곡률이고, 극한곡률 ϕ_u 는 최대하중 후에 하중재하능력이 최대하중의 75%로 저하했을 때의 곡률이다^[9]. Table 2는 편심압축실험체의 항복곡률, 극한곡률, 그리고 연성도를 보여준다. 강섬유 혼합콘크리트를 피복PC에 사용한 C1의 연성도가 $\mu = 5.30$ 으로 가장 높았으며, 서로 동일한 단면형상을 가진 C2, C3의 연성도는 각각 $\mu = 2.26, 2.48$ 이었다. 한편 용접철망으로 횡보강을 한 C4는 연성도가 $\mu = 3.30$ 으로 C2, C3보다 높았다.

3.3. 변형률 계측결과

Fig. 8는 실험체가 최대하중에 도달했을 때 기둥 중앙부

에서의 강재 및 철근의 변형률로부터 계측한 단면의 변형률 분포와 피복콘크리트 압축연단의 극한변형률 ϵ_{cu} 를 나타낸 것이다. 편심율이 0.125인 C1, C3, C4는 극한상태에서 전 단면이 압축변형률을 나타내며 편심율이 0.375인 C2는 극한상태에서 단면의 일부구간이 인장변형률을 나타낸다. 전반적으로 극한압축변형률이 0.0024~0.0032에 분포하였으며 이는 단면해석에서 콘크리트의 압괴변형률로 가정하는 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 와 어느정도 유사한 결과이다.

Fig. 9은 변형률 게이지로 계측한 횡철근의 변형률을 보여준다. 특히 압축력을 받는 피복PC에 대한 횡철근의 구속 효과를 평가하기 위해 변형률 게이지는 압축부에 위치한 횡철근에 부착하였다. C1, C2, C3, C4는 중앙부 및 상하부에서 횡철근의 변형률을 계측하였으며 C5는 중앙부와 하부에서 횡철근의 변형률을 계측하였다. 각각의 위치에서 최대하중의 45% 시점, 최대하중, 최대하중 후 최대하중의 75% 시점에 대한 변형률을 나타냈다. 그래프 안에 그려진 그림

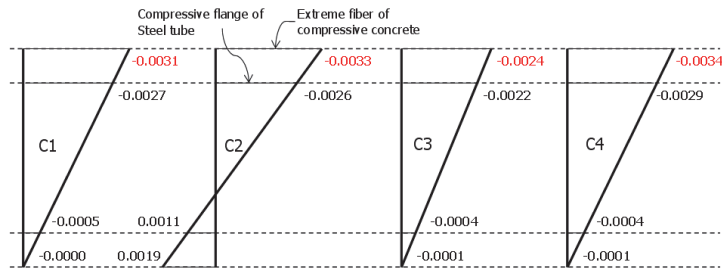


Fig. 8. Strain distribution at ultimate load

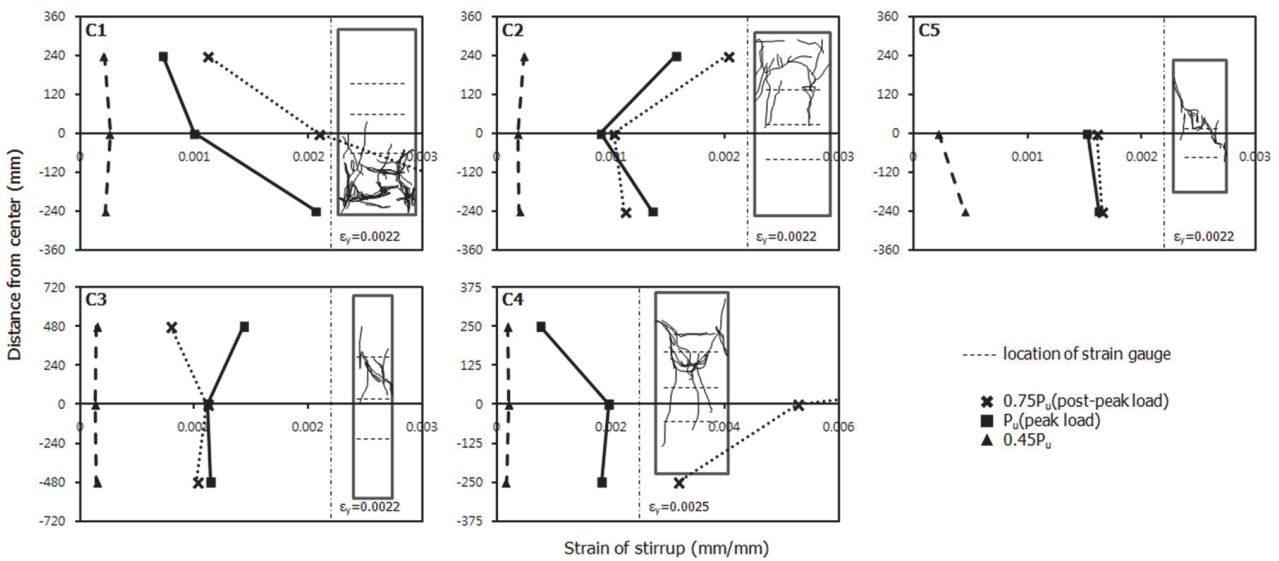


Fig. 9. Strain of ties

은 기둥 압축면에서의 균열양상을 나타낸 것이다.

기본상세를 적용한 C2, C3, C5의 경우 실험 종료 시까지 횡철근이 항복하지 않았다. 이는 횡철근이 피복PC를 효과적으로 구속하지 못하고 피복PC가 탈락하였음을 의미한다. 반면 피복부에 강섬유 콘크리트를 사용한 C1의 경우 파괴 위치의 횡철근이 항복하였다. 이는 최대하중 도달 후에도 강섬유 콘크리트가 탈락하지 않고 큰 변형을 겪으면서 팽창하였기 때문이다. C4도 최대하중 도달 후 파괴 부위의 용접 철망이 크게 항복하였다.

4. 설계기준과의 비교

콘크리트피복 CFT기둥의 설계기준에 대한 적용성을 평가하기 위하여 다양한 설계기준(ACI 318-08^[10], ANSI/AISC 360-10^[11], Eurocode 4^[12], AIJ^[7])에 따른 휨·압축성능 및 유효휨강성을 실험결과와 비교하였다.

4.1 휨·압축성능

먼저 합성단면의 순수압축강도는 KBC 2009^[13]에 따라 다음과 같이 계산한다.

$$P_n = 0.85f_{ck}A_c + F_yA_s + F_{yr}A_r \tag{3}$$

식 (3)에서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, F_y 는 강재의 항복강도, F_{yr} 는 주철근의 항복강도이다. A_c, A_s, A_r 는 각각 콘크리트의 단면적, 강재의 단면적, 주철근의 단면적이다. 설계기준 간 직접비교를 위하여 합성단면의 강도 평가 시, 부재강도감소계수 및 재료강도감소계수는 무시하였다. 또한

강재, 콘크리트, 철근의 재료강도는 재료실험에 의한 실제 강도를 적용하였으며(Table 1) 강재 및 철근은 응력-변형률의 완전소성관계를 가정하였다.

ACI 318은 피복PC 압축단면의 극한변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 과 선형변형률분포를 가정한 변형률적합법을 적용하여 단면의 성능을 평가한다. 변형률적합법을 통해 축력-모멘트 상관곡선을 구할 때 일반적으로 Whitney의 등가직사각형 응력블록을 가정하게 되는데, LW PC 합성기둥과 같이 피복PC와 충전콘크리트의 압축강도가 다를 경우 Fig. 10와 같이 중립축의 위치는 동일하더라도 콘크리트 강도의 영향을 받는 유효압축깊이가 다르게 정의된다.

ANSI/AISC 360의 Method 1에서는 합성단면을 등가의 강재기둥으로 치환한 후, 소성응력분포에 기반하여 2선형으로 축력-모멘트 관계를 간략화한다. Eurocode 4에서는 기본적으로 소성응력분포에 의한 단면강도평가를 권장하고 있으며 4개의 주요 성능점을 연결하는 Simplified Method도 허용한다.

AIJ의 SRC기준에서는 특별히 콘크리트피복 CFT기둥을 위한 상관곡선 작성법을 제시하고 있다. Fig. 11와 같이 합성단면을 피복RC, 강관, 충전콘크리트의 세 가지 요소를 분리하여 이들을 중첩하는 방법을 사용하고 있다. 이 때 충전콘크리트는 휨에 대한 기여도가 없다고 간주하여 축력에만 기여하도록 한다.

Fig. 12은 실험체의 중앙부 단면에서의 휨·압축 거동을 설계기준(ACI 318, ANSI/AISC 360, Eurocode 4, AIJ)에 의한 단면의 축력-모멘트 상관곡선과 비교한 것이다. 편심율 0.125로 설계한 C1, C3, C4는 설계기준의 강도를 모두 만족하였으며 편심율 0.375로 설계한 C2는 Eurocode 4를 제외하고 설계기준을 만족하였다.

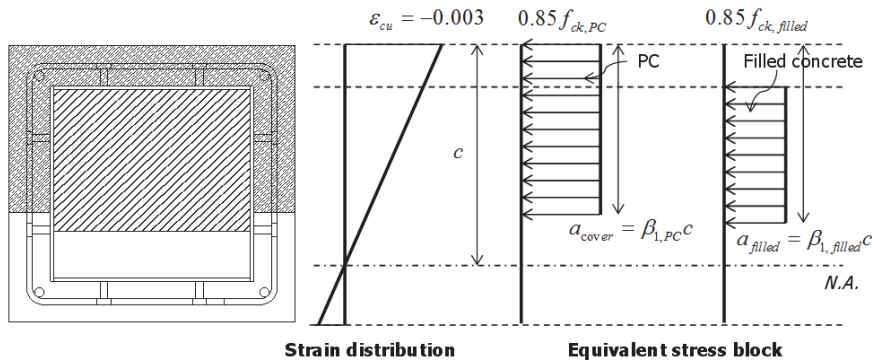


Fig. 10. Equivalent stress block

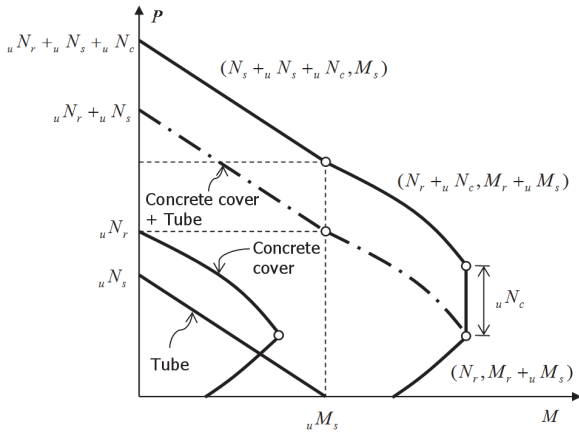


Fig. 11. P-M curve defined by AIJ SRC provision

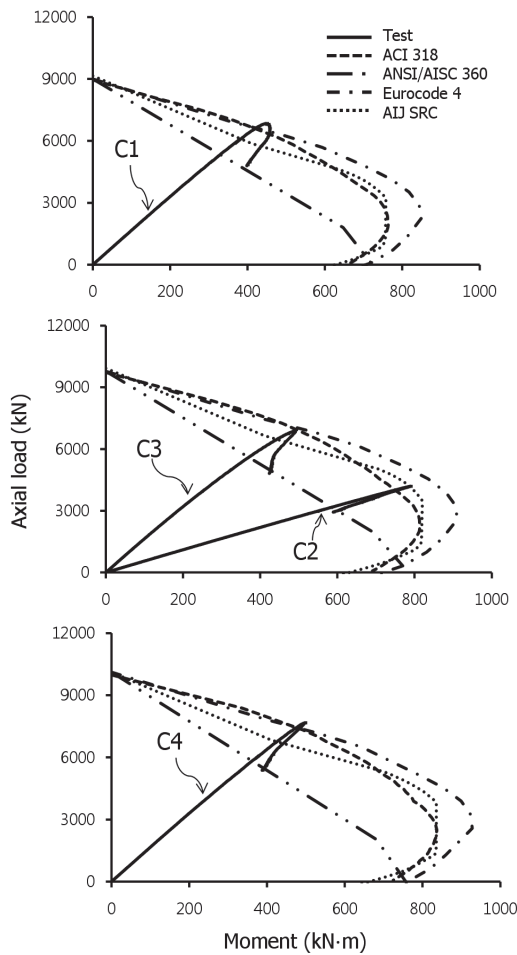


Fig. 12. Axial load-moment relationship of specimens

Fig. 12으로부터 실험결과는 ACI 318에 의한 상관곡선과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Eurocode 4는 편심이 큰 영역에서 기둥 강도를 과대평가하는 경향이 있었

Table 3. Comparison of test results with expectation

Specimen	Maximum load, P_u	Expected load, P_n	P_u/P_n
C1	6844 kN	6499 kN	105 %
C2	4195 kN	3962 kN	106 %
C3	6883 kN	6651 kN	103 %
C4	7674 kN	7305 kN	105 %
C5	8332 kN	7002 kN	119 %

며, ANSI/AISC 360은 전반적으로 결과를 크게 과소평가하였다. 한편 AIJ SRC는 편심율이 작을 경우 결과를 과소평가하였지만 ACI 318과 가장 유사한 형상을 나타냈다.

참고로 KBC 2009에서는 합성단면의 휨·압축성능 평가시 소성응력분포법 혹은 변형률적합법을 적용하도록 규정하고 있다. Fig. 5에서 C1~C4의 예측강도는 변형률적합법에 의한 단면해석에 2차효과까지 고려한 값이고, C5의 예측강도는 단순히 식 (3)으로 평가하였다. 2차효과 고려시, 식 (1)에서의 Δ 는 4.2의 식 (4)~(6)로부터 구하였으며 이때 유효휨강성 EI_{eff} 는 식 (8)을 이용하였다. 예측강도와 실험결과는 Table 3에 정리하였으며 편심압축실험체는 예측강도의 약 103~106%를, 중심압축실험체는 예측강도의 약 119%를 발휘하였다.

4.2 유효휨강성

현행 설계기준에서는, 압축부재의 좌굴강도 및 하중작용의 2차효과를 평가시 주요 변수로서 유효휨강성 EI_{eff} 를 적용하도록 규정하고 있다. 따라서 실제 실험에서 기둥의 파괴시점에 따른 유효휨강성을 실험적으로 구하고 이를 설계기준에서 제시하는 식들과의 비교를 통해 현행 설계기준의 유효휨강성의 적용성을 평가하였다.

유효휨강성의 실험값은 실험체의 최대강도 P_u 및 이때 계측한 중앙부에서의 횡변위 Δ 를 이용하여 구하였다^[14]. 여기서 기둥 중앙부에서 계측한 횡변위 Δ 는 탄성 안정론에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta = y_0 + y_{max} \tag{4}$$

식 (4)에서 y_0 는 초기 기둥단면의 중심선을 기준으로 한 기둥부(Fig. 3) 단부에서의 횡변위이고, y_{max} 는 기둥부 단부를 기준으로 한 중앙부에서의 횡변위로 Fig. 13에 나타나

있다. 기둥부의 휨강성이 $EI = EI_{eff}$ 로 균일하다고 가정하였을 때 y_0, y_{max} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y_0 = \frac{(1 - \cos kL)kL_0e}{\sin kL + (\cos kL - 1)kL_0} \quad (5)$$

$$y_{max} = (\sec \frac{kL}{2} - 1)(e + y_0) \quad (6)$$

식 (5),(6)에서 $k = \sqrt{P_u/EI_{eff}}$, L 은 기둥부 길이로서 C1, C2, C4는 $L = 1,360\text{mm}$, C3은 $L = 2,800\text{mm}$ 이다. L_0 는 보강부와 나이프엣지 길이를 더한 760mm 이다. 기둥부에서 휨 변형이 일어나며 보강부 및 나이프엣지는 무한 휨강성을 가정하였다. 유효휨강성 EI_{eff} 의 실험값은 실험결과

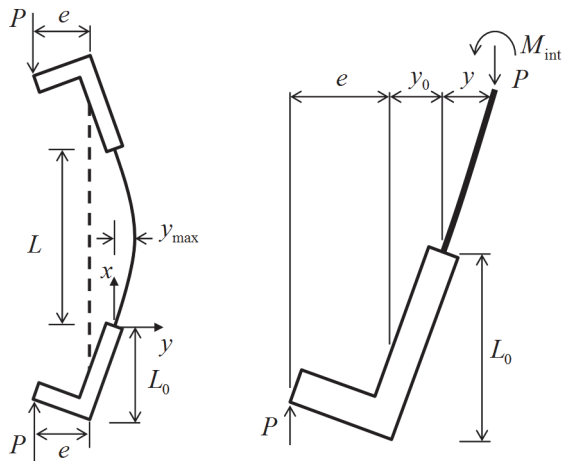


Fig. 13. Deformed shape of eccentrically loaded specimens

Table 4. Effective flexural stiffness EI_{eff} ($\times 10^4 \text{kN}\cdot\text{m}^2$)

Specimen	Test result	ACI318	ANSI /AISC 360	Eurocode 4
C1	6.15	5.15	5.31	8.33
		(84%)	(86%)	(135%)
C2	7.24	5.38	5.51	8.85
		(74%)	(76%)	(122%)
C3	8.74	5.38	5.51	8.85
		(62%)	(63%)	(101%)
C4	7.65	5.38	5.83	9.43
		(70%)	(76%)	(123%)
Average		73%	75%	120%

인 P_u, Δ 및 식 (4)~(6)을 이용하여 계산할 수 있다.

기존설계기준의 유효휨강성의 평가식은 다음과 같으며 식 (7)은 ACI 318, 식 (8)은 ANSI/AISC 360, 식 (9)는 Eurocode 4를 나타낸다.

$$EI_{eff} = 0.2E_cI_g + E_sI_s \quad (7)$$

$$EI_{eff} = E_sI_s + 0.5E_rI_r + c_1E_cI_c \quad (8)$$

$$EI_{eff} = 0.9(E_sI_s + E_rI_r + 0.5E_cI_c) \quad (9)$$

여기서 E_c, E_s, E_r 은 각각 콘크리트, 강재, 철근의 탄성계수이며 I_g, I_s, I_r 은 각각 콘크리트, 강재, 철근의 단면2차모멘트이다. 한편 $c_1 = 0.1 + 2A_s/(A_c + A_s) \leq 0.3$ 로 정의된다.

Table 4는 실험으로부터 얻은 유효휨강성과 기존 평가식으로부터 얻은 유효휨강성의 예측값을 보여준다. 괄호 안은 예측값/실험값을 나타낸다. ACI 318 및 ANSI/AISC 360로부터 구한 유효휨강성은 각각 실험값의 평균 73%, 75% 수준으로 LW PC 합성기둥의 유효휨강성을 안전측으로 과소평가하였으며, Eurocode 4에 의한 유효휨강성은 실험값의 평균 120% 수준으로 LW PC 합성기둥의 유효휨강성을 비안전측으로 과대평가하였다.

5. 결론

각형 강관을 적용한 콘크리트피복 CFT기둥(LW PC 합성기둥)의 구조성능을 검증하기 위한 기초연구로서 LW PC 합성기둥 부재에 대한 편심압축 및 중심압축 실험을 수행하였다. LW PC 실험체는 각형 강관 및 종방향 철근과 횡방향 철근을 공장제작하여 피복부와 내부에 서로 다른 강도의 콘크리트를 타설하여 실험체를 제작하였다. 피복콘크리트의 종류, 편심거리, 유효길이, 그리고 횡보강 상세를 실험변수로 하여 피복형 CFT의 구조성능을 평가하였다. 주요 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) LW PC 합성기둥 실험체는 KBC 2009의 합성구조 설계기준에 제시된 휨·압축 성능 및 공칭압축강도를 상회하는 하중재하능력을 보였다. 편심압축실험체는 예상강도의 약 103~106%를, 중심압축실험체는 예상강도의 약 119%를 발휘하였다.

- (2) 피복PC의 극한변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 을 가정한 변형률저항법을 이용한 단면해석은 LW PC 합성기둥의 휨·압축 강도를 안전 측으로 그리고 합리적으로 예측하였다.
- (3) 기본상세를 적용한 C2, C3, C5는 피복PC의 수직균열 발생 후 피복PC가 탈락하면서 하중재하능력이 급격히 저하하였다. 얇은 강관 두께 또는 큰 판폭두께비로 인한 강관의 국부좌굴이 피복PC의 탈락과 복합적으로 작용한 것으로 보인다. 하중 감소 정도는 편심거리가 작을수록 컸다.
- (4) 피복부에 강섬유 혼합콘크리트를 적용한 C1은 강도저하가 완만하였으며 우수한 변형능력을 보였다. 용접철망으로 확보강한 C4는 기본상세와 유사한 파괴양상을 보였다.
- (5) 실험결과는 ACI 318에 의한 상관곡선과 비교적 잘 일치하였다. 한편 ANSI/AISC 360은 전반적으로 결과를 과소평가하였으며 Eurocode 4는 편심율이 큰 실험체의 강도를 과대평가하였다.
- (6) LW PC 합성기둥의 유효휨강성은 ACI 318과 ANSI/AISC 360이 각각 실험값의 평균 73%와 75%로 안전측으로 과소평가하였으며, Eurocode 4는 실험값의 평균 120%로 비안전측으로 과대평가하였다.

감사의 글

본 연구는 신세계건설, 더나은구조, 우림PC, 삼환까무의 연구비 지원과 한국건설교통기술평가원의 2009년도 첨단 도시개발사업(09 R&D A01) 및 R&D정책인프라사업(11기술표준화09-01)의 일련으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 日本鋼構造協会(2010) 하이브리드構造接合部設計ガイドブック,テクニカルレポート No. 90, 日本鋼構造協会, 日本.
Japanese Society of Steel Construction (2010) *Design Guidebook for Connections of Hybrid Structures*, Technical Report No. 90, JSSC, Japan (in Japanese).
- [2] 松井千秋, 津田恵吾, 森武史(2010) 被覆形鋼管コンクリート柱材における鋼管の幅厚比・径厚比の制限値, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 第63巻, 第503号, pp.157-163.
Matsui, C., Tsuda, K., and Mori, T. (1998) Limiting Width (Diameter)-Thickness Ratio of Tubes of Composite Steel Tube and Concrete Columns with Encased Type Section, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Architectural Institute of Japan, Vol.63, No.503, pp.157-163 (in Japanese).
- [3] 山下賢司, 藤元安宏, 林承燦, 六郷恵哲(2005) 複数微細ひび割れ型コンクリートにより被覆した鋼管の曲げ破壊性状とひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, 第27巻, 第1号, pp.301-306.
Yamashita, K., Fujimoto, Y., Lim, S.-C., and Rokugou, K. (2005) Bending Failure Behavior and Crack Properties of Steel Tubes Covered with Multiple-Crack-Type Concrete, *Proceedings of the Japan Concrete Institute, JCI*, Vol.27, No.1, pp.301-306 (in Japanese).
- [4] 宮内靖昌, 福原武史, 廣重隆明, 武藤肇(2010) 充填被覆形鋼管コンクリート造の構造性能に関する実験的研究: その1 柱部材の構造性能(合成構造柱(1),構造III), 学術講演梗概集: C-1, 構造III, 日本建築学会, pp.1359-1360.
Miyachi, Y., Fukuhara, T., Hiroshige, T., and Muto, K. (2010) Seismic Behavior of Reinforced Concrete Covered CFT Structural Elements, Part 1: Performance of Columns, *Summaries of Technical Papers of Annual Meetings of Architectural Institute of Japan: C-1, Structures III*, AIJ, pp.1359-1360 (in Japanese).
- [5] 五十嵐定義, 井上一郎, 辻岡静雄, 巖詰煥, 額谷浩史(1988) 鉄骨柱とプレキャスト板を頭付きスタッドで一体化した合成柱に関する研究: 合成柱の力学的性能に関する予備的考察(構造), 日本建築学会近畿支部研究報告集 - 構造系, 第28巻, pp.137-140.
Igarashi, T., Inoue, I., Tsuzioka, S., Eom, C.H., and Nukatani, H. (1988) Mechanical Properties of Composite Column Connected Steel Column and Precast Concrete Board with Headed Stud, *Research Report of Kinki Branch of Architectural Institute of Japan*, Kinki Branch of AIJ, Vol.28, pp.137-140 (in Japanese).
- [6] 김철환, 김성은(1996) SPC합성기둥의 역학특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제12권, 제3호, pp.143-151.
Kim, C.H., and Kim, S.E. (1996) Structural Characteristics of a New Composite Column Composed of Steel Square Tube and Precast Concrete Panels, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.12, No.3, pp.143-151

- (in Korean).
- [7] Architectural Institute of Japan (2001) *AIJ Standards for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures and Brief Commentary* (5th Ed.), Japan.
- [8] 김창수, 박홍근, 최인락, 정경수, 김진호(2010) 800MPa 강재 및 100MPa 콘크리트를 적용한 매입형 합성기둥의 구조 성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.497-509.
Kim, C.S., Park, H.G., Choi, I.R., Chung, K.S., and Kim, J.H. (2010) Structural Performance of Concrete-Encased Steel Columns Using 800MPa Steel and 100MPa Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.497-509 (in Korean).
- [9] Park, R. (1988) State-of-the-Art Report on Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing, *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 8), Japan Association for Earthquake Disaster Prevention, Japan, pp.605-616.
- [10] American Concrete Institute (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 381-08) and *Commentary*, Appendix D: Anchoring to Concrete, USA.
- [11] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [12] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building* (EN 1994-1-1: 2004), Belgium.
- [13] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code* (KBC 2009) and *Commentary*, Kimoon dang, Korea (in Korean).
- [14] 김창수, 박홍근, 이호준, 최인락(2013) 800MPa 강재 및 100MPa 콘크리트를 적용한 ㄱ형 강재 매입형 합성기둥의 편심압축실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제2호, pp.209-222.
Kim, C.S., Park, H.G., Lee, H.J., and Choi, I.R. (2013) Eccentric Axial Loading Test for Concrete-Encased L-Section Columns Using 800MPa Steel and 100MPa Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.2, pp.209-222 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 콘크리트충전 각형강관에 구조용 피복콘크리트를 적용한 합성기둥에 대하여 연구하였다. 1/3~1/2 축소모델의 편심 압축실험체 4개와 중심압축실험체 1개를 제작하여 압축실험을 수행하였다. 실험 변수는 피복콘크리트의 강섬유 첨가여부, 편심거리, 기둥길이, 그리고 횡보강 상세이다. 일부 실험체에서 최대강도 도달 후 피복콘크리트의 탈락으로 인한 강도저하가 발생하였으나 모든 실험체는 현행 설계기준(KBC 2009)에 의한 휨·압축 강도 및 공칭 압축강도를 초과하는 하중재하능력을 보였다.

핵심용어 : 합성기둥, 콘크리트충전 강관, 피복콘크리트, 프리캐스트 콘크리트, 중공 PC
