중공비율에 따른 중공 프리캐스트 철근콘크리트 기둥의 압축거동

이승준¹⁾ · 서수연^{1)*} · 배문용¹⁾ · 김강수²⁾

¹⁾한국교통대학교 건축공학과 ²⁾서울시립대학교 건축학부

Compressive Behavior of Precast Concrete Column with Hollow Corresponding to Hollow Ratio

Seung-Jun Lee,¹⁾ Soo-Yeon Seo,^{1)*} Peiwenlong,¹⁾ and Kang-Su Kim,²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

ABSTRACT From several researches, recently, it was found that using hollowed precast concrete (HPC) column made more compact concrete casting in joint region possible than using normal solid PC (Precast concrete) column. Therefore, the rigidity of joints can be improved like those of monolithic reinforced concrete (RC). After filling the hollow with grout concrete, however, it is expected that the HPC column behaviors like composite structure since PC element and grout concrete have different materials as well as there is a contact surface between two elements. These may affect the structural behavior and strength of the composite column. A compressive strength test was performed for the HPC column with parameter of hollow ratio for the case with and without grout in the hollow and the result is presented in this paper. The hollow ratios in the test are 35, 50 and 59% of whole section of column. Concentrated axial force was applied to top of the specimens supported as pin connection for both ends. In addition, finite element (FE) analysis was performed to simulate the failure behavior of HPC column for axial compression. As a result, it was found that the hollow ratio did not affect the initial stiffness of HPC filled with grout regardless of the strength difference of HPC and grout. However the strength was increased inversely corresponding to the hollow ratio. The structural capacity of HPC without grout closely related to the hollow size. Especially, the local collapse governs the overall failure when the thickness of HPC is too thin. Based on these effect, a suitable equation was suggested for calculation of the compressive strength of HPC column with or without grout. FE analysis considering the contact surface between HPC and grout produced a good result matched to the test result.

Keywords : hollow precast concrete column, concentrated axial force, hollow ratio, grout concrete, local collapse

1. 서 론

1.1 연구배경

국내의 건설시장은 노동에 대한 인식이 변화하면서 건설현장 기피현상으로 젊은 기능공의 감소에 따른 노동 인력 수급의 어려움과 현장조건에 따른 품질 저하문제를 개선하기 위한 노력이 필요한 것으로 인식되고 있다. 이에 대한 방안으로써, PC(precast concrete)공법은 콘크리트의 품질관리가 가능하고 현장 타설 콘크리트 공법에 비해 노동력 감소와 공기를 단축시킬 수 있는 특징을 갖고 있다. 최근에는, PC 공법의 경우 부재간 단절에 의한 응

력 불연속 구간이 접합부에 형성되어 일체 타설된 RC (reinforced concrete) 구조와 같은 성능을 발휘하기가 쉽지 않기 때문에 PC와 현장 타설 콘크리트를 합성하여 사용하는 복합화 공법의 적용이 증가하고 있는 것으로 보고¹⁾되고 있다.

이와 같은 복합화 공법의 일환으로 최근 중공형 PC부를 공장에서 원심성형으로 제작하고 현장에서 중공부에 채움 콘크리트를 타설하는 중공 PC(hollowed precast concrete, 이하 HPC라 칭함) 기둥이 개발되어 연구^{2,3)}가 진행되고 있다. 특히 Seo 등³⁾은 커플러 이음을 적용한 HPC 기둥 접합부에 관한 실험연구로 부터, HPC 기둥을 적용한 접합부의 구조 성능이 일체식 RC 접합부와 거의 대등함을 확인하고 내진 구조시스템에 HPC 기둥을 적용할 수 있음을 제시하였다.

HPC 기둥은 원심력 다짐으로 기존의 PC 기둥에 비해 고강도화 할 수 있고 또한 거푸집형태로 제작하여 현장에 반입한 뒤 설치하기 때문에, 시공시 작업하중을 줄일 수

*Corresponding author E-mail : syseo@ut.ac.kr

Received December 30, 2013, Revised March 5, 2014,

Accepted March 12, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

있으며 이에 따라 시공성을 개선할 수 있는 장점이 있다. 그렇지만, 중공부에 콘크리트를 후 타설하기 때문에, 기둥을 구성하는 재료가 단일 재료가 아니며 특히 두 재료 사이에 접촉면이 존재하는 합성구조가 된다. 이에 따라 압축력 작용 시 HPC와 충전콘크리트의 축응력 및 변형 능력의 차이와 두 재료의 경계면에서 부착파괴에 의해 압축성능이 저하될 가능성이 있다. 또한 미충전 상태에서의 HPC 기둥은 중공의 크기에 따라 사용하중 하에서 균열이 발생하고 국부적인 파괴가 발생할 수 있다. 이와 같은 거동특성에 대하여 HPC기둥의 거동을 실험과 이론적으로 파악한 뒤 설계를 위한 자료를 구축해야 하지만, 현재까지 전술한 연구이외에 국내외에서 HPC기둥에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않는 실정이다.

1.2 연구 목적 및 방법

이 연구에서는 축하중을 받는 HPC 기둥에서 중공비율에 따른 압축성능을 규명하고자 하며 특히 충전콘크리트가 채워지기 전과 채워진 이후에 대하여 각각 변수에 대한 압축성능을 실험적으로 연구하고자 한다. 또한 재료적 특성과 두 재료사이 접촉면의 영향을 고려한 유한요소해석을 실시하여 복합거동을 하는 HPC 기둥의 압축거동을 적절하게 묘사할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

연구방법으로서, HPC 기둥의 중공비를 변수로 하여 중공내 충전콘크리트의 채움여부를 고려하여 총 6개의 실험체를 제작한 후 실험을 통하여 압축성능을 평가하고자 한다. 그리고 실험 결과를 근거로 하여 현행규준에서 정하는 철근콘크리트 기둥의 압축강도와 실험강도를 비교하여 현행규준식의 적용 가능성을 평가한다. 유한요소해석(finite element analysis)에서는 두 이질재료가 접합되는 접합면의 특성을 반영하여 응력의 흐름 및 균열양상을 해석결과와 실험을 비교하고 해석에서의 신뢰도를 검증한다.

2. 압축 실험

2.1 실험 계획 및 제작

중심 압축력을 받는 HPC 기둥의 구조실험을 위해 HPC 기둥의 중공률을 변수로 중공직경 200(중공률 35%), 240(50%), 260 mm(59%)인 충전된 HPC 기둥과 미충전 HPC 기둥으로 총 6개의 실험체를 계획하였다. 각 실험체 일람은 Table 1, 실험체 형상 및 배근상세는 Fig. 2에 나타내었다.

모든 기둥 실험체의 단면은 300 mm×300 mm×1000 mm, 피복두께는 20 mm로 하였으며, 주근비(ρ)는 2.4%, 전단보강근의 체적비(ρ_h)는 0.14%이다. 횡보강근은 135°의 구부림 각도를 가지고 6d_b의 여장길이를 배치하였고, 양 끝단의 100 mm부분에는 단부효과에 따른 국부파괴가 발생하지 않도록 하고 실험구간에서 파괴를 유도하기 위해 FRP

Table 1 Test variables of specimens

Specimens	Column section D×B (mm×mm)	Hollow size	
		Diameter (mm)	Hollow ratio (%)
C-200 ⁽¹⁾	300×300	200	35
C-240		240	50
C-260		260	59
U-200		200	35
U-240		240	50
U-260		260	59

⁽¹⁾C-200 (C: composite HPC column, U: unfilled HPC column, 200: hollow diameter)

(a) Assembling bars in mold

(b) Concrete casting

(c) Mold rotating

(d) Steam curing

Fig. 1 Manufacturing process of HPC

Fig. 2 Detail of specimens (unit: mm)

시트를 2겹으로 보강하였다.

HPC 기둥의 제작은 선 조립된 철근을 몰드에 체결하고 콘크리트를 타설한 뒤 원심다짐과 증기양생을 거쳐 HPC의 중공부에 콘크리트를 타설하여 실험체를 제작하였다. Fig. 2는 HPC 기둥의 제작과정을 나타낸다.

2.2 사용재료

이 실험에서 사용한 콘크리트의 설계기준 강도는 30 MPa이며, 실험체별 콘크리트 강도는 Table 2에 나타내었다. KS F 2405에 따라 총 실험체 마다 3개의 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 공시체를 제작하여 실험체와 동일한 조건으로 증기양생을 거쳐 양생하였다. 콘크리트의 강도시험은 기동실험 직전에 실시하였고, 공시체의 평균 강도는 Table 3에 나타내었다. 실험체에 배근된 철근은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 주근 4-D19와 8-D13, 횡보강근 D6@133 철근을 사용하였다. KS D 3504 및 3552의 규정에 따라 철근 인장시험편을 제작하여 인장시험을 실시하였으며, 시험 결과는 Table 3과 같다.

Table 2 Strength of concrete

Specimen		Design strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
HPC	CU-200	30	29.5
	CU-240		30.6
	CU-260		31.4
Grout concrete		21	18

Table 3 Mechanical properties of reinforcements

Type of reinforcement	Bar size	Yield strength (MPa)	Yield strain ($\times 10^{-6}$)	Ultimated strength (MPa)
Longitudinal bar	SD19	386	1885	689.97
	SD13	405	1950	688.54
Hoop	SD6	462	2185	721.57

2.3 실험 방법

Fig. 3과 같이 모든 실험체에 대하여 변형을 측정하기 위해 양면의 주근과 횡보강근에 총 6개의 변형률 게이지

Fig. 3 Test setup of specimen

를 미리 부착하였다. 콘크리트의 변형을 측정하기 위해 기둥의 중앙과 중앙부에서 우측으로 75 mm 떨어진 위치에 기둥의 핀을 축으로 실험체의 양면에 변형률 게이지를 부착하였다.

하중 가력 시 실험체의 축방향 변형을 측정하기 위해서 실험체의 4면에 수직으로 변위계(the linear variable differential transformer, 이하 LVDT)를 설치하였고, 작용 축력에 따른 횡방향 팽창변형을 측정하기 위하여 아래에서부터 200, 500, 800 mm 위치에 3개의 LVDT를 수평으로 설치하였다.

5000 kN 용량의 유압 만능 시험기를 사용하여 0.02 mm/sec의 속도로 변위제어 방식 중심압축가력으로 실험하였다. 실험체 가력 및 측정 장치는 Fig. 3와 같다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 최종파괴양상

중공부분이 채워진 HPC 합성기둥의 경우, 공통적으로 초기에 상·하부 FRP sheet와의 경계면에서 균열이 발생되기 시작하였으며, 수직균열이 발생한 후 점차 중앙부로 이어지는 균열이 발생하였다. 이때 일부 피복콘크리

(a) C-200

(b) C-240

(c) C-260

(d) U-200

(e) U-240

(f) U-260

Fig. 4 failure mode of specimens

트가 박리되고, 최대하중 전·후로 횡보강근이 항복한 뒤 주근이 항복하는 순으로 파괴가 진행되었다.

미충전된 HPC 기둥의 경우, 중공직경이 커질수록 상부 FRP sheet 경계면 부분에서 국부적인 콘크리트 박리와 최대하중 이후 상부에서 횡보강근과 주근이 항복되면서 최종파괴가 나타났다. Fig. 4는 실험체별 최종파괴양상을 나타낸다.

3.2 하중-변위 곡선

축변위는 양단간 수직길이의 변화를 나타낸 것이며, 수직으로 설치된 4개의 LVDT의 평균변위이다. 중공부가 채워진 HPC 합성기둥 실험체는 중공직경에 상관없이 초기강성이 유사하게 나타났다. 중공직경이 작은 실험체일수록 HPC의 단면적이 커지는 영향으로 최대내력이 증가하였으며, 최대내력 이후 모든 실험체에서 내력이 점차 저하하는 것으로 나타났다.

중공직경이 200 mm 보다 큰 U240, U260 미충전 HPC 기둥은 중공직경이 커질수록 초기강성 및 최대내력 그리고 기둥의 변형이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 중공직경에 따른 HPC 합성기둥과 미충전 HPC 기둥의 하중-

Fig. 5 Load-displacement curves (composite HPC series)

Fig. 6 Load-displacement curves (unfilled HPC series)

변위 관계는 Fig. 5와 6에 나타난 바와 같다.

중공내부에 콘크리트가 충전된 HPC 합성기둥의 최대 내력 시 횡변형은 중공직경에 상관없이 상단부에서는 1.5 mm 정도의 변형량을 보였고 중앙부의 횡변형은 상단부의 변형보다 0.2~0.5 mm 변형이 더 생기면서 최대 횡변형이 중앙부에서 나타났다. 미충전된 HPC 기둥의 경우 기둥의 하부, 중앙부, 상단부 순으로 변형량이 커졌으며, 상단부에서 최대 횡변형을 보였다. 이는 앞서 서술한 파괴모드와 연관되어 상단부에서 응력이 집중되어 국부적인 박리현상을 보이면서 파괴됨에 따라 상단부에서의 횡방향변위가 높게 나타난 것으로 보인다.

3.3 기둥 내력 평가

실험으로부터 얻은 결과와 재료실험 결과를 근거로 산정된 콘크리트설계기준⁴⁾과 ACI⁵⁾ 기준식으로 내력을 산정하고 이를 실험 결과와 비교하였다.

중심축력을 받는 기둥의 최대내력을 계산하는 식은 두 기준에서 모두 동일한 식을 사용하도록 하고 있다. 이 연구에서와 같이 중공이 있는 기둥의 경우에는 HPC, 충전 콘크리트 그리고 철근 강도의 합으로 내력을 산정할 수 있다. 식 (1)은 두 기준에서 제시하고 있는 식을 중공 PC 기둥에 적합하도록 정리한 것이다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 PC부분을 나타내고, 두 번째 항은 중공내부에 충전되는 그라우트 콘크리트를 나타내며 마지막 세 번째 항은 철근에 의한 내력을 나타낸다. 실험 결과와 기준식에 의해 계산된 결과를 비교하여 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7로부터, 내부가 충전된 기둥의 경우에는 기준식에 의한 최대내력에 대하여 104~111%로서 계산한 값이 실험 결과와 좋은 대응을 보임을 알 수 있다.

$$P_0 = 0.85f_{pc}(A_g - A_{hc} - A_{st}) + 0.85f_{hc}A_{hc} + f_yA_s \quad (1)$$

여기서, f_{pc} : HPC 압축강도, A_g : 전체단면적, A_s : 주근단면적, A_{hc} , f_{hc} : 충전 그라우트의 단면적, 강도

그러나 중공부분이 채워지지 않은 경우에는 식 (1)의

Fig. 7 Comparison of results from test and Eq. (1)

Fig. 8 Regression analysis result between strength ratio of hollow PC and D/t

Table 4 Comparisons of test result and calculation result

Specimen	Exp.	Eq.(1)	Exp./Eq.(1)	Eq.(5)	Exp./Eq.(5)
C-200	2958	2670	1.11	2670	1.11
C-240	2691	2550	1.06	2550	1.06
C-260	2652	2555	1.04	2555	1.04
U-200	2252	2303	0.98	2239	1.02
U-240	1665	1951	0.85	1686	1.02
U-260	1278	1750	0.73	1277	1.04

두 번째 중공부분의 기여도를 반영하지 않더라도 중공이 커질수록 실험 결과가 계산 결과의 73~98% 배로서, 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4 (d)~(f)의 파괴상황과 같이, 실험체 상부에서 국부적인 파괴에 의해 내력이 결정됨에 따라 HPC가 충분히 내력을 발휘하지 못하기 때문이다. 이와 같은 현상은 중공율이 커짐에 따라 HPC부재의 두께가 과도하게 얇아지게 되고 이 경우에는 HPC부재가 작용축력에 대하여 박판과 같이 면외 변형을 일으키는 국부파괴에 의해 내력이 결정되기 때문으로 볼 수 있다. 철근을 제외한 중공 PC콘크리트만의 실험강도와 식 (1)의 중공 PC콘크리트내력 비를 중공직경과 HPC기둥의 두께(D/t)관계로 나타내면 Fig. 8과 같이 선형적인 관계를 보인다. 식 (2)로 표현된 회귀식을 정리하면, 식(4)와 같은 국부좌굴 영향계수를 얻을 수 있다. 이를 식 (5)와 같이 미충전 HPC 기둥실험체 U200, U240, U260에 적용한 결과, Table 4에 나타난 바와 같이 실험내력과 국부좌굴 영향고려 계수를 고려하여 내력을 산정한 결과와의 비가 102~104% 수준으로 HPC 기둥의 내력산정을 적합하게 평가하고 있음을 알 수 있다.

$$\alpha = 1.18 - 0.054 \times \frac{D}{t} \quad (2)$$

$t = B - D$ 를 대입하고 정리하면,

$$\alpha = 1.18 \frac{B - 1.10D}{B - D} \quad (3)$$

$B - 1.10D$ 를 유효두께 t_e 라 하면, 식 (3)은 식 (4)와 같은 계수로 정리할 수 있다. 이를 식 (1)에 대입하면 국부좌굴계수를 도입한 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{D}{t} < 1.8 \text{ 일 때, } \alpha &= 1.0 \\ \frac{D}{t} \geq 1.8 \text{ 일 때, } \alpha &= 1.18 \frac{t_e}{t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_0 = 0.85\alpha f_{pc}(A_g - A_{hc} - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (5)$$

여기서, α 는 PC판의 국부좌굴을 고려한 두께영향계수, t 는 중공 PC의 두께, t_e 는 중공 PC의 유효두께, B 는 기둥의 폭 또는 깊이, D 는 중공의 직경.

4. 해 석

4.1 유한요소 해석개요

중심축력을 받는 HPC기둥의 내부 충전여부에 따른 파괴기구를 파악하기 위하여 각 실험체들에 대하여 유한요소해석을 실시하였다. 내부가 충전된 HPC기둥의 경우에는 후 타설되는 충전 그라우트와 PC부분의 계면특성에 따라 영향을 받기 때문에 이를 고려하여 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS-FEA⁶⁾이다.

4.2 균열 모델

콘크리트의 균열모델은 이산균열모델(discrete crack model)과 분산균열모델(smeared crack model)로 구분할 수 있다. 이산균열모델은 균열을 경계로 분리된 유한요소를 사용하는 방법이며, 분산균열모델의 경우 균열이 분산 분포된 것으로 가정하여 균열 위치에 분리된 요소를 사용하는 방법이다. Fig. 9는 이산균열모델에서 직교균열과 회전균열 모델을 나타낸다.

고정균열모델은 축이 결정되면 변화하지 않는 것으로 가정하기 때문에 균열면에서 수직응력과 전단응력이 존

Fig. 9 Discrete crack model

재한다. 회전균열모델에서는 전 단계에서 발생한 균열을 무시하며 현재의 주변형률 방향에서 균열이 발생하는 것으로 가정하고 균열각이 수직인 경우만을 고려하기 때문에 직교균열모델로 분류할 수 있다. 고정균열 모델의 경우 회전균열 비하여 강성과 강도를 약간 과대 평가하는 경향이 있어 회전균열모델을 적용하여 해석하였고 이 균열 모델의 이론적 배경은 전변형률을 바탕으로 구성된 수정압축장 이론⁷⁾과 3차원 확장 모델⁸⁾로 구성되어 있고 콘크리트 균열모델은 회전균열 모델을 적용하여 해석하였다.

4.3 계면의 접촉모델

HPC 합성기둥은 HPC와 충전콘크리트의 접촉면이 생기기 때문에 이 접촉면의 정의가 필요하다. 계면조건인 모델에서 접합접촉(symmetric weld contact)과 일반접촉(symmetric general contact)의 두 가지 모델이 사용가능하며 이 중 접합접촉은 두 면이 분리되는 것을 허용하지 않아 모델의 법선방향과 접선방향으로 하중을 전달한다. 일반접촉은 두 면이 해석 전에 붙어있으나 해석 중에 접촉면이 분리되는 경우와 해석 중에 두 면이 접촉과 분리를 반복하는 경우 사용하는 기능이다.

실제 HPC는 공장에서 원심력으로 제작되기 때문에 내부면, 즉 충전그라우트와 접촉되는 부분의 면이 매우 매끄럽게 형성되고 원심력회전이 부유물 등에 의한 막이 형성될 수 있다. 그러므로 이 부분에서 충전그라우트와의 완전한 부착은 기대할 수 없다. 따라서 이 해석에서는 법선방향으로만 하중을 전달하는 일반접촉 모델을 이용

하여 해석을 진행하였다.

4.4 유한요소해석 모델링

중심 축력을 받는 HPC기둥의 실험과 같은 조건으로 PC부와 채움콘크리트를 따로 모델링하여 압축모델은 multi-linear로 정의하였고 주근과 횡보강근의 위치는 실험체와 동일한 위치에 모델링하여 bi-linear로 철근의 재료의 특성을 정의하였다. 콘크리트와 철근의 재료정의는 재료실험 결과를 근거로 하였다. 경계조건은 하부에 변위를 구속시켜 초기상태에서 변위가 발생하지 않도록 하고 편심 없이 일정한 축력이 가력되도록 힌지를 가정하였다. 하중의 가력은 변위를 점증시키는 방법으로 제어하였다.

비선형해석시에 일반적인 유한요소해석프로그램에서 사용하는 해법은 반복법을 사용한다. 반복법에서는 비선형해석의 해가 되는 변위는 매 반복해석 증분변위의 누적으로 나타나게 된다. MIDAS-FEA에서 사용 가능한 반복법중에 수렴속도가 빠르고 적은 수의 반복을 통해서 수렴하는 뉴턴 랩슨법을 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 10은 재료모델을 나타내고 있다.

4.5 해석 결과

Fig. 11과 12는 HPC 기둥의 응력분포 및 균열패턴을 보여주고 있다. 해석 결과, 응력분포는 초기에 기둥의 단부에서 응력이 높았고 점차 중앙부 충전콘크리트로 진전

Fig. 10 Material model

Fig. 11 Stress distribution at each step

Fig. 12 Crack distribution at each step

Fig. 13 Comparison of load-displacement curve for test and FEA results

되는 양상을 보였으며 실험 결과와 비슷하게 최대하중 이후에 HPC 부재에서 국부적인 응력저하 현상과 변형을 보이는 것으로 나타났다.

MIDAS-FEA에서는 균열은 파란색의 디스크형태로 나타낼 수 있다. 해석 결과, 초기에 기둥의 상·하단부에서 균열이 발생하였고 점차 중앙부로 균열이 진전되면서 최대하중에 도달한 이후에 HPC 기둥의 전체 면에 균열이 발생하는 양상을 보였다.

중공내부가 충전된 HPC 합성기둥의 실험 결과와 해석 결과의 최대강도의 비는 94~95%수준으로 하중-변위관계를 해석에서 잘 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 미충전 HPC 기둥의 경우 최대내력의 비가 63~81%로 차이가 비교적 크게 나타났다. 이는 미충전 HPC 기둥의 실험에서 나타난 상부에서의 국부적인 파괴에 의한 면외방향 좌굴현상을 해석에서 적절하게 고려하지 못함에 기인한 것으로 판단된다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 HPC 기둥의 중공률에 따른 압축성능을 파악하고자, 중공률에 따른 압축실험과 유한요소해석 연구를 실시하였다. 특히 중공내부를 충전한 경우와 충전하지 않은 두 경우에 대하여 모두 연구함으로써 시공단계와 시공완료후의 구조재로서 설계를 위한 자료를 파악하고자 하였다. 실험과 해석적 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 중공 내부가 충전된 HPC 합성기둥의 초기균열하중 및 초기강성은 중공직경에 상관없이 유사하게 나타

났다. 미충전 HPC 기둥의 경우에는 중공직경이 커질수록 초기강성 및 최대내력, 변형능력이 크게 저하하였다. 이는 횡변형 및 응력의 집중이 기둥의 상단부에서 집중되어 국부적인 면외방향의 변형으로 기둥의 상단부 국부파괴에 인한 것으로 사료된다.

- 2) HPC 기둥의 내력을 평가한 결과, 충전된 HPC 기둥은 KCI 규준식에 의한 최대내력에 대하여 좋은 대응을 보였으나, 중공부분이 채워지지 않은 미충전 HPC 기둥의 경우에는 중공직경이 커질수록 KCI 규준식의 내력에 대해 실험강도의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 미충전 HPC 실험체의 실험 결과를 회귀분석하여 얻은 국부좌굴영향계수를 기존 규준식에 적용하여 실험 결과와 비교한 결과 KCI 규준식에 대해서 102~104% 수준으로 실험 결과와 계산 결과가 좋은 대응을 보이 것으로 나타났다. 다만 이 결과는 3개의 실험체를 대상으로 얻은 결과로서 제안된 식의 검증에 위한 추후 연구가 필요하다.
- 3) 유한요소해석 해석 결과, 응력전달은 초기단부에서 시작하여 중앙부로 점차 전달되는 것으로 나타났으며 균열 양상은 기둥의 상하단부에서 균열이 발생하였고 점차 중앙부로 균열이 진전되면서 최대하중에 도달하는 것으로 나타나 실제 실험 결과와 유사한 거동을 나타내었다. 또한 하중변위 관계에서 전반적으로 초기강성 및 전체적인 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났으나 미충전 HPC기둥에서의 국부적인 면외좌굴은 적절하게 고려하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 박 판이론을 근거로 한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 R&D 정책인프라사업의 연구비(11 기술표준화 07-01)지원과 2013년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2012R1A 2A2A02010512)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Lee, J. M. and Choi, I. S., "Present and Future of Precast Concrete Structure," Architectural Institute of Korea, April, 2007, pp. 76-83.
2. Kim, T. H., "Development of High Strength and Spun Concrete Column," Daelim Technology Review, 2012, pp. 132-136.
3. Seo, S. Y., Yoon, S. J., and Lee, W. J., "Evaluation of Structural Performance of the Hollow PC Column Joint Subjected to Cyclic Lateral Load," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 335-343.
4. Korea "Concrete Design Code and Commentary," Kimoon-dang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012. pp. 123-140.
5. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-11)," *ACI Committee, American Concrete Institute*, 2011, pp. 137-139.
6. Midas IT, "MIDAS FEA Ver. 3.4.0 Manual," Manual of Midas IT, 2012, pp. 225-290.
7. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Journal*, Vol. 83, No. 22 1986, pp. 219-231. (doi: <http://10.14359/10416>)
8. Selby, R. G. and Vecchio, F. J., "Three-Dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete," Report No. 93-02, Department, of Civil Engineering, University of Toronto, 1993, pp. 124-147.

요 약 최근 일련의 연구로부터, 중공이 있는 프리캐스트 콘크리트(hollowed precast concrete, HPC) 기둥을 사용할 경우, 일반적인 PC기둥에 비하여 접합부 콘크리트를 충실하게 채울수 있으며 이에 따라, 접합부의 고정도는 일체식 철근콘크리트(RC)와 같이 향상될 수 있음이 확인되었다. 그러나 충전콘크리트로 중공부가 채워진 후, HPC부재와 충전콘크리트의 강도가 서로 다르고 이 두 부재 사이에는 접촉면이 있음에 따라 합성구조와 같은 거동을 보이게 되며 이는 합성된 기둥의 구조적 거동과 강도에 영향을 미치게 된다. 이 논문에서는 HPC 기둥에서 중공의 크기와 중공부분 콘크리트의 채움 유무에 따른 기둥의 압축강도 시험을 실시하였다. 중공의 비율은 35, 50 그리고 59%이며 실험체의 양단을 단순지지 형태로 지지한 뒤 중심압축력을 기둥의 상단에 작용시켰다. 또한 압축에 대한 HPC 기둥의 파괴거동을 묘사하기 위하여 유한요소 해석을 실시하였다. 실험 결과, 중공내부가 충전콘크리트로 채워진 기둥에서, PC와 충전콘크리트의 강도차이와 상관없이 중공률은 기둥의 초기강성에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 기둥의 압축강도는 중공률에 반비례하는 것으로 나타났다. 충전콘크리트가 채워지지 않은 HPC기둥의 구조성능은 중공의 직경에 밀접하게 관련이 있는 것으로 나타났으며, 특히, HPC의 두께가 지나치게 얇은 경우에는 국부적인 파괴가 전체 파괴를 지배하는 것으로 나타났다. 이러한 영향을 고려하여 HPC기둥의 압축내력을 산정할 수 있는 식을 제시하였다. 유한요소해석에서는, HPC와 충전콘크리트 사이의 접촉면을 고려할 경우, 해석 결과가 실험 결과와 좋은 대응을 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 중공 PC 기둥, 중심축력, 중공률, 충전콘크리트, 국부파괴