

PCS 구조 시스템의 내진 성능 분석

박순규^{1)*} · 여인석¹⁾

¹⁾울산대학교 건축공학과

Experimental Test for Seismic Performance of PCS Structural System

Soon-Kyu Park^{1)*} and In-Seok Yeo¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT The PCS system, which consists of precast concrete column and steel beam, is a kind of composite structural systems. In this paper, experimental study has been conducted to analyze seismic performance of bolted beam-to-column connections for the PCS system. Based on experimental results from the seismic testing of eight interior PCS specimens, it shows that behavior of PCS system is satisfactory to seismic performance criteria of ACI such as strength deterioration, stiffness degradation and energy dissipation capacity except initial stiffness. All of the specimens maintain their strength at large levels of story drift without significant loss of stiffness and show high ductility level for inelastic behavior. The energy dissipation capacity is two times greater than requirement of ACI criterion. But the initial stiffness of all specimens does not satisfy ACI criterion, and this phenomenon is similar to the other composite structural systems such as RCS, CFT system.

Keywords : PCS, seismic performance, bolted beam-to-column connection, composite structure

1. 서 론

성능이 서로 다른 재료를 결합하여 건물의 구조적인 성능을 향상시키고 부재의 효율성을 극대화하는 합성 구조는 국내외에서 활발히 연구되고 있는 분야중 하나이다. 이미 합성 구조는 오랜 기간의 연구를 통하여 우수한 역학적 성능이 입증되었으며 다양한 접합부 개발과 더불어 합리적인 공법으로도 인정받고 있다¹⁾. 이렇게 합성 구조가 성공적으로 구현될 수 있었던 것은 철근콘크리트 기둥과 철골보를 효과적으로 결합하는 접합부에 관한 연구가 착실히 이루어졌기 때문이다.

콘크리트와 철골이라는 서로 다른 재료를 접합하는 것은 합성 구조에 있어서 가장 중요한 문제이다. 합성 구조는 그 특성상 구조물의 일체성을 확보하는데 어려움을 가지며 그로 인해 접합부의 성능이 합성 구조의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 단일 재료를 사용하는 구조라도 건식 공법을 사용할 경우나 접합부 결합이 치밀하지 않으면 그 구조의 일체성을 확보하는데 문제를 가져올 수도 있다.

단일 구조인 철골 모멘트 골조가 내진 성능이 우수하다는 통념을 깨고 1994년 미국 노스리지 지진으로 인해

용접부의 접합부 파괴라는 기둥과 보의 구조적 일체성을 상실시키는 매우 치명적인 결함을 발생시킨 것이 그 대표적인 예이다²⁾. 접합부의 파괴는 우리가 설계한 것과는 다른 상이한 거동을 발생시킬 뿐만 아니라 구조물의 붕괴라는 최악의 상황까지도 발생시킬 수 있다. 그러므로 어떠한 구조 시스템이든 접합부의 성능을 파악하는 것이 반드시 요구된다.

이에 본 연구에서는 기존의 합성구조와는 달리 PC 구조와 철골 구조의 건식 공법의 장점을 살리며 시공성 및 경제성을 개선한 PCS 구조 시스템 접합부의 구조적 특성을 파악하고 내진 성능을 평가하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험 개요

2.1 PCS 구조 시스템

PCS (precast concrete column-steel beam) 구조 시스템은 PC 기둥과 철골보로 이루어지는 합성 구조 시스템의 일종이다. 이 시스템은 일반적인 철골 구조에서 기둥을 PC 기둥으로 대체한 것으로서 강축과 약축을 가지는 기존의 H형강 기둥에 비해 내력상 유리하고 내화 성능이 개선되는 장점을 가진다. 특히, 보-기둥 접합부를 단부 평판과 볼트로 연결함으로써 완전건식공법이 가능하도록 개발되었다.

*Corresponding author E-mail : pask@mail.ulsan.ac.kr
Received November 16, 2006, Accepted March 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

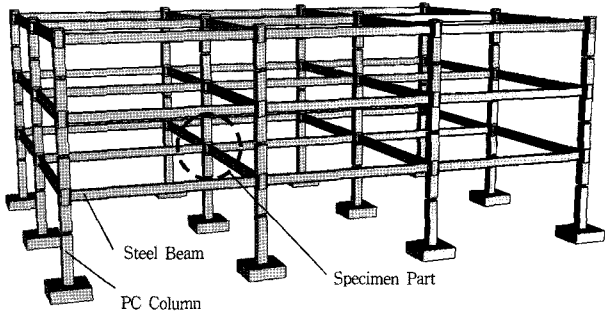


Fig. 1 Building structure used PCS systems

2.2 실험체 구성

PCS 구조 시스템은 강봉으로 보강된 PC 기둥과 단부 스킨(scallop)에 의해 단면이 감소된 H형강으로 구성된다 (Fig. 1). 보와 기둥의 접합부를 구성하는 방법으로 보의 단부에는 단부 평판을 사용하였으며, 고장력 인장볼트를 관통시켜 접합이 가능하도록 하였다. 볼트에는 초기 긴장력을 가하여 접합부의 강성 및 내진 성능이 개선될 수 있도록 하였으며, 단부 평판과 기둥면 사이에는 네오프렌패드를 사용하여 완전건식공법이 가능하도록 하였다. 이와 같은 PCS 구조 시스템 접합부의 내진 성능을 분석하기 위하여 보와 기둥이 “+” 연결된 인테리어형 실험체를 계획하였다.

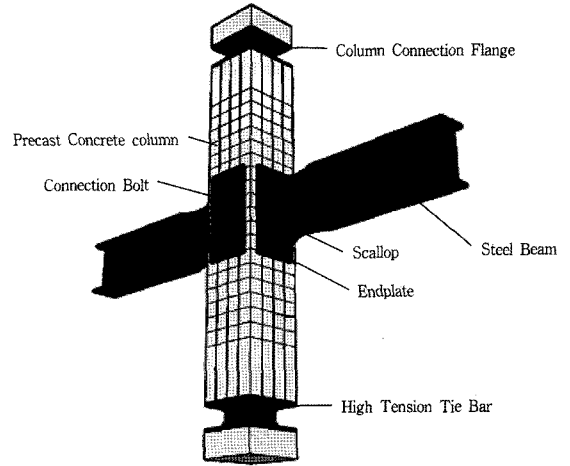
2.3 실험 계획

본 연구에서는 구조적 성능에 중요한 영향을 미치는 PC 기둥의 보강 형태, H형 강보 단부의 scallop의 크기 및 보와 슬래브의 합성 정도 등을 실험 변수로 하였다.

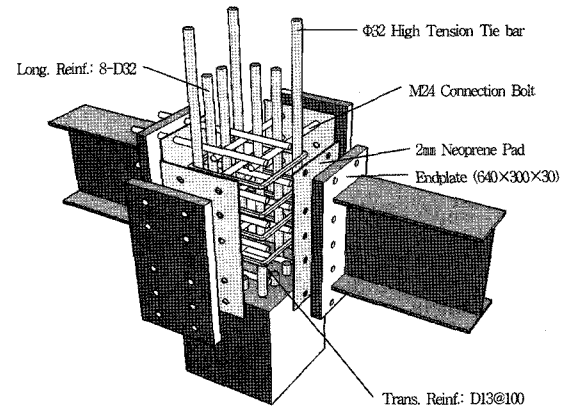
모든 PC 기둥의 크기는 400 mm × 400 mm이며 PC 기둥에 삽입되는 고강도 강봉은 steel pipe에 삽입하는 방법과 쉬스 (sheath)에 삽입 후 모르타르 충전하는 방법, 커플러형의 강봉을 삽입하는 방법을 사용하였다. 콘크리트의 공칭압축강도는 30 MPa이며, 보강용 철근의 재질은 SD40, 강봉은 SM930이다.

보는 H400 × 200 × 8 × 13의 H형강을 사용하였다. 보의 단부에는 관통형 볼트로 접합이 가능하도록 단부 평판을 설치하였으며, 볼트에는 100 kN·cm 조임력을 가하여 접합부의 강성능이 개선되도록 하였다. 보에는 기둥대비 보의 강도성능을 조절하기 위하여 스킨(scallop)을 두었다. 보와 단부 평판의 재질은 SS400이며, 관통형 볼트는 SCM440이다. 슬래브는 일반적인 복배근을 사용하였으며, 보와의 합성은 스티드볼트를 이용하였다. 합성 정도에 따른 특성을 파악하기 위하여 실험체별로 합성 정도에 차이를 두었으며, 기둥과 슬래브 사이의 국부적인 파괴를 방지하기 위하여 접합면을 우레탄 폼으로 충전한 실험체 또한 계획하였다. 슬래브 타설시 사용된 콘크리트의 공칭압축강도는 24 MPa이며 철근은 SD40을 사용하였다 (Fig. 2, Table 1).

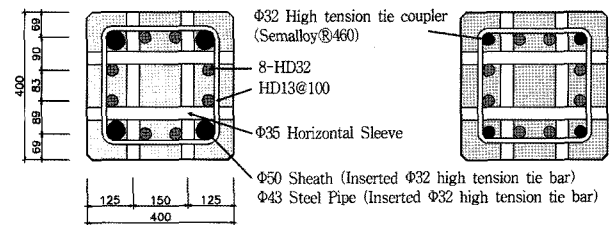
실험에 사용된 소재 및 제품의 성능은 KS (Korean Industrial Standard) 규준에 의거하여 실험 및 분석하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.



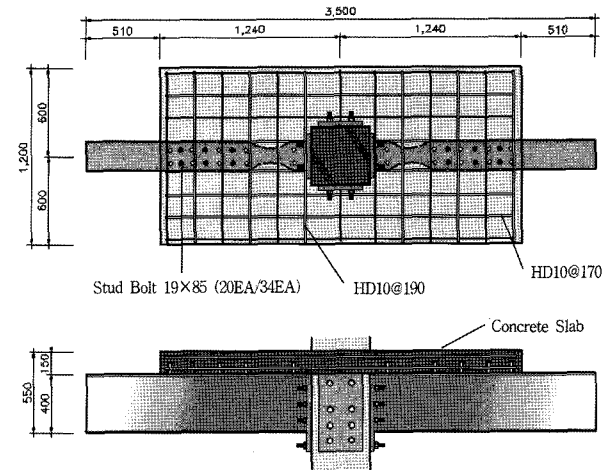
(a) Composition of test specimen



(b) Details of the joint



(c) Reinforcement of column



(d) Reinforcement of concrete slab

Fig. 2 Composition of the specimen

2.4 실험 방법

본 연구에서는 실험 크기의 인테리어 조인트형 기둥-보 부분 구조 실험체에 대하여 내진 성능을 분석하기 위

Table 1 Detail of specimens

Specimen	Column type	Scallop size (mm)	Composite slab	Note
3VP2-NS-SL2	Void & steel pipe	No	None	Column (C300) size : 400 mm × 400 mm
3VP2-5S-SL2		50	None	
3VP2-3S-SL3		30	Semi (53%)	
3SC2-NS-SL2	Solid & coupler	No	None	Beam (SS400) H-400 × 200 × 8 × 13
3SC2-5S-SL2		50	None	
3SC2-3S-SL3		30	Semi (53%)	
3SS2-NS-SL2	Solid & sheath pipe	No	None	Slab (C240) Connection bolt Prestress : 193 kN
3SS2-5S-SL3		50	Semi (33%)	

Table 2 Properties of material used (unit : MPa)

Measured	Steel bar			Beam			Connection bolt	H. tension bar	Concrete	
	HD10	HD13	HD32	Flange	Web	End plate	M24	φ32	C300	C240
F _y	449.2	531.6	436.4	337.9	372.9	306.6	1,001.4	978.1	34.6	16.1
F _u	643.2	647.5	638.7	471.1	482.7	455.5	1,096.9	1,077.7	(Comp.)	(Comp.)

한 반복하중 비대칭 가력 시험을 계획하였다. 이를 위해 실험체 양쪽의 보 단부에 최대 500 kN까지 가력이 가능한 액츄에이터를 설치하였으며 상하 방향으로 가력하였다. 실험체 설치는 Fig. 3와 같으며 철골보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 보의 단부에는 앵글 지지대를 설치하였다.

액츄에이터 가력 프로그램은 ACI의 모멘트프레임에 관한 내진 성능 실험 방안을 참고하였다. ACI 내진 성능 평가 기준에서는 drift ratio 3.5%까지 가력하도록 제안하고 있지만 본 연구에서는 실험체의 파괴 양상을 관측하기 위하여 drift ratio 7.0%까지 변위 제어 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

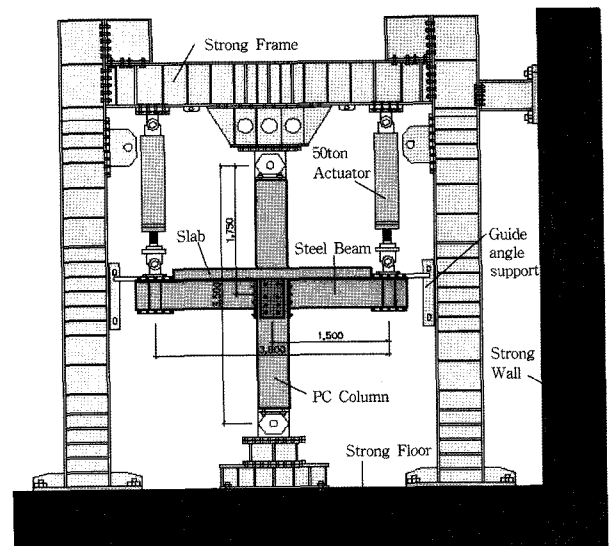
3.1 실험 결과 및 파괴 양상

실험체는 파괴 모드에 따라 보가 파괴된 경우와 기둥이 파괴된 경우로 나눌 수 있으며, 슬래브가 타설된 실험체와 비슬래브 실험체로 구분할 수 있다.

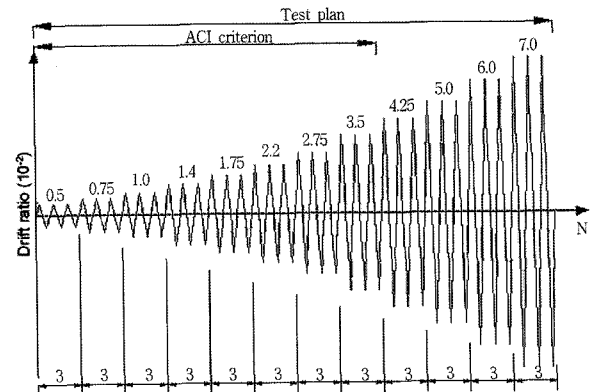
보가 파괴된 실험체는 기둥 단부와 패널존에서 균열이 발생하였으며, 단부 평판에 의한 구속 효과가 상대적으로 작은 패널존의 상하부 모서리는 콘크리트 피복의 박리 현상이 발생하였다. 그러나 실험 종료까지 기둥에 큰 손상이 발생하지는 않았다. 반면 철골보는 항복 이후 스텔럽 부위의 상하부 플랜지에서 내화 피복의 박리가 발생하였으며, 플랜지와 웨브가 국부 좌굴을 일으키며 파괴되었다.

기둥이 파괴된 실험체는 기둥 중앙부 및 단부에서 다수의 균열이 발생하였으며, 실험이 종료된 drift 7.0%에서는 패널존 상하 부분과 기둥 단부가 급격히 파괴되는 바람직하지 못한 파괴 모드를 보여주었다. 보는 실험 종료까지 내화 피복의 박리만 일어날 뿐 좌굴은 발생하지 않았다.

슬래브가 타설된 실험체는 기둥과 슬래브의 접합면이 압축력에 의해 파괴되는 특징이 있었다. 슬래브의 기둥 접합면을 우레탄으로 보강한 3VP2-3S-SL3 실험체는 슬



(a) Test set-up



(b) Loading program

Fig. 3 Test program

래브의 접합부 파괴가 발생하지 않았으며, 패널존 상하 부분의 파괴도 다른 슬래브가 타설된 실험체에 비해 작았다. 합성 정도가 적은 3SS2-5S-SL3 실험체는 drift 5.0%에서 스테드 커넥터가 파단되었다.

모든 실험체의 기둥 패널존 부분은 균열만 있을 뿐 파괴는 발생하지 않았다.

3.2 하중-이력거동

보가 파괴되는 비슬래브 실험체의 경우 스키텔럽이 있는 실험체와 없는 실험체 간의 이력 거동에 차이가 있음을 알 수 있다. 스키텔럽이 없는 경우 기둥의 손상으로 인한 에너지 소산 능력의 감소가 나타나는 반면 스키텔럽을 둔 실험체는 기둥의 손상을 방지하면서 보의 파괴만을 유도하였다. 슬래브가 타설된 실험체의 경우에도 비슬래브 실험체와 마찬가지로 스키텔럽에 의해 파괴 모드를 조절하고 있다. 이에 비추어 볼 때 스키텔럽이 파괴 모드 조절에 매우 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 3VP2-5S-SL2 실험체는 drift 7.0%에서 보 플랜지가 파단되어 강도 및 강성 성능이 급격히 감소하였다 (Figs. 4와 5).

기둥이 파괴되는 실험체의 경우 바람직하지 못한 이력 거동을 보여주고 있다. 3VP2-NS-SL2 실험체의 경우 drift

5.0% 이후 기둥 손상 증가로 인해 강도 및 강성 성능이 급격히 감소하고 있으며, 스키텔럽이 설치된 슬래브 실험체의 경우에도 슬래브와 보의 합성에 따른 보의 강도 성능 증가로 인해 파괴 모드 조절에 실패하여 에너지 소산 능력이 저하되었다. 또한 슬래브가 타설된 실험체는 다른 실험체와 비교해 강성 저하가 심하게 나타났으며, 비대칭의 이력 거동을 보였다. 이는 타설된 슬래브가 이력 거동 및 파괴 모드 조절에 좋지 않은 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 3SS2-5S-SL3 실험체는 drift 5.0%에서 스테드 커넥터가 파단되어 순간적인 강도 저하가 발생하였다 (Table 3).

모든 실험체가 가력 방향이 바뀔 때 갑자기 변위가 발생하는 약간의 슬립 현상을 보였다. 이러한 현상의 원인은 PCS 구조 시스템이 완전한 건식공법이기 때문에 접합부가 완전히 일체화되지 못하여 발생하는 것으로 판단된다.

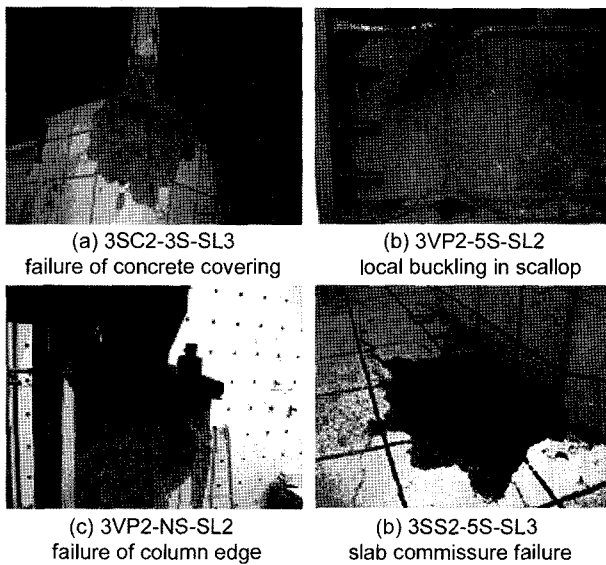


Fig. 4 Typical failure pattern

3.3 ACI 기준에 의한 PCS의 내진 성능 평가

3.3.1 강도 성능

각 실험체의 강도 성능을 분석한 결과는 Table 4와 같

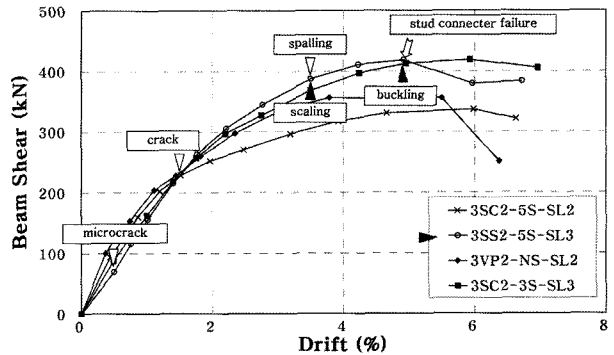


Fig. 5 Observation

Table 3 Experimental results

Failure mode	Composite slab	Specimen	Drift (%)											Characteristic		
			0.5	0.75	1.0	1.4	1.75	2.2	2.75	3.5	4.25	5.0	6.0		7.0	
Beam failure	None	3VP2-5S-SL2	◇				◆		□			■				No column damage
		3SC2-5S-SL2	□		◇				■				■	◆		
		3SC2-NS-SL2	□			◇				■	◆			■		A little column damage
		3SS2-NS-SL2	□			■	◇			■		●				
	Semi(33%)	3SS2-5S-SL3	□			■	▲			□	▲	●			Stud connector failure (drift 5.0%)	
Column failure	None	3VP2-NS-SL2			◇			□	◆	◆		■	■	◆	○	Critical column damage
		3SC2-3S-SL3	□		■					■	◆		◆	■		
		3VP2-3S-SL3		◇		□	◆	■	◆	■	◆				■	Used polyurethane foam No slab damage
	Semi(55%)				□	◆	■	◆	■	◆						

PC column central part □ microcrack ■ bending crack ■ spalling ■ failure
 PC column edge ◇ microcrack ◆ vertical crack ◆ spalling ◆ failure
 Scallop part of steel beam ○ scaling of fire protection ● local buckling
 Slab-column commissure part △ microcrack ▲ crack ▲ failure

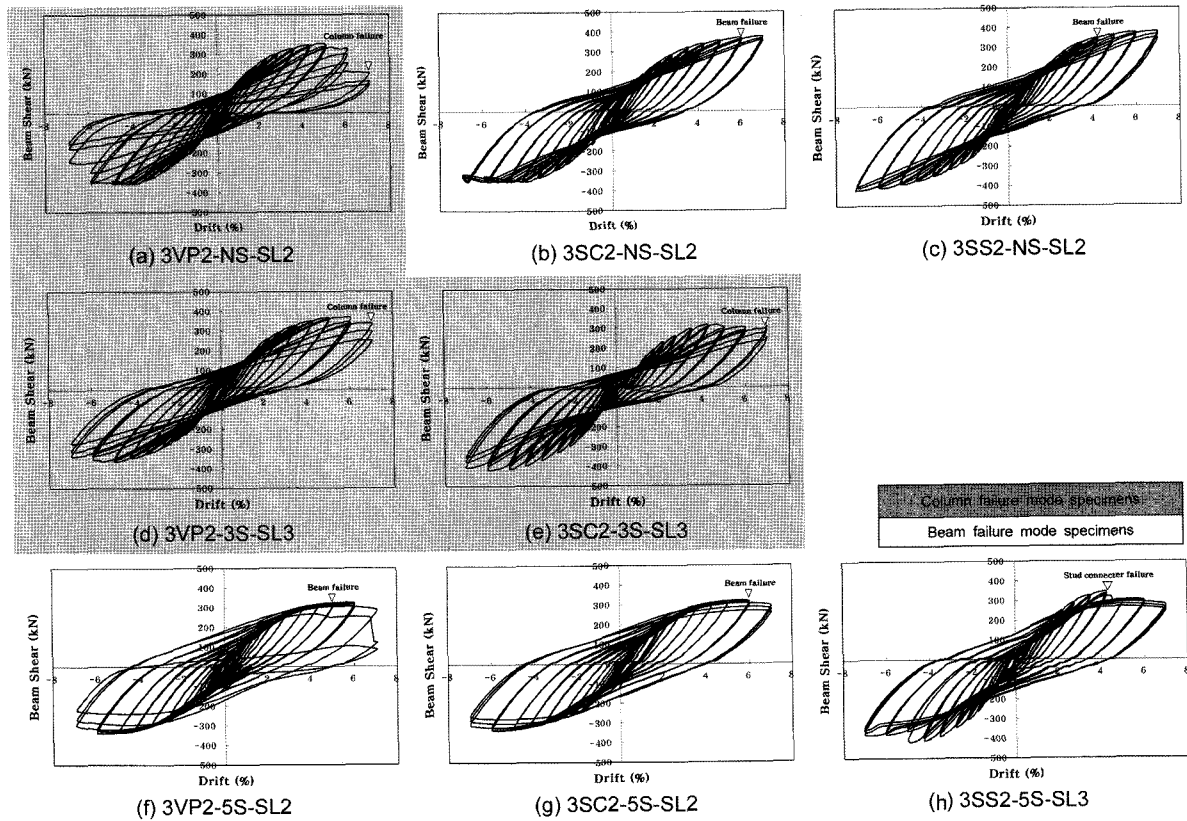


Fig. 6 Load-drift response

다. 분석 결과 실험체의 강도 성능은 보의 스캘럽 크기에 의해 결정되었다. 이는 기둥의 콘크리트가 압축 파괴된 이후에도 기둥 내부의 고강도 강봉과 철근에 잉여력이 남아있었기 때문이다. 또한 H 형강의 경우 스캘럽을 가진 실험체는 국부 좌굴이 뒤늦게 발생하여 한계 상태까지 강도를 끌어낸 반면, 항복 이후 국부 좌굴이 발생한 비스캘럽 실험체들은 한계 상태에 이르는 강도 성능을 발휘하지 못하였다. 이러한 사실들은 스캘럽을 가진 실험체가 강도 성능에도 상대적으로 유리하며, 개발된 PC 기둥의 강도 성능 또한 콘크리트 파괴 이후에도 강도를 유지하는 우수한 성능을 가지고 있음을 보여준다.

슬래브가 타설된 실험체들은 슬래브의 구속 효과로 인해 철골보 상부 플랜지의 좌굴이 발생하지 않았으며, 그로인해 비슬래브 실험체보다 높은 강도를 보여주었다. 보와 슬래브의 합성 정도에 따른 강도 성능의 차이는 보

이지 않았으며, 슬래브와 기둥의 접합면을 우레탄으로 보강한 실험체 (3VP2-3S-SL3)는 양방향 강도 성능 증가가 동일한 특이점을 보여주었다.

PCS기둥 패널존의 전단강도 성능은 ACI 352R-91 규준에 의해 계산되었다³⁾. 접합부 형식 및 접합부 분류에 따른 계수 값은 양방향 단부 평판 보강과 4변에 수평 부재가 부착되었음을 고려한 24를 사용하였다. 계산된 강도 성능과 실제 실험에 의한 결과를 비교해 볼 때 패널존의 강도 성능이 계산된 값보다 훨씬 더 우수함을 알 수 있다.

그로 인해 패널존에서는 파괴가 발생하지 않았으며 기둥의 경우 휨파괴, 보의 경우 전단면이 소성에 도달한 이후 플랜지와 웨브의 국부좌굴에 의해 파괴되었다. 결국 국 본 연구에서 실험한 PCS 실험체의 강도 성능은 기둥과 보의 강도 성능에 의해 결정됨을 보여준다.

ACI에서는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방

Table 4 Calculated strengths (unit : kN)

Beam shear		Steel beam					Shear	Precast concrete column				Panel zone $\gamma = 24$ Shear	Endplate Bendign	Connection bolt Tension
		Bending						High tension tie bar						
		RBS (0 cm)	RBS (3 cm)		RBS (5 cm)			Void	Solid					
			without slab	with slab	without slab	with slab			Bending	Shear	Bending			
Nominal strength	Py,n	219.7	203.0	244.3	157.0	192.7	219.7	153.6	-	191.9	-	-	227.5	376.4
	Pp,n	245.5	235.0	361.7	189.0	289.4	-	198.6	597.6	358.1	597.6	274.4	-	-
	Pu,n	409.2	316.4	523.9	254.5	417.6	409.2	-	-	-	-	-	379.8	-
Calculated strength	Py,r	309.4	230.9	344.2	178.6	271.4	309.4	169.6	-	213.7	-	-	284.4	410.3
	Pp,r	345.8	267.3	461.5	215.0	371.7	-	214.5	641.8	378.3	641.8	294.7	-	-
	Pu,r	481.9	372.5	599.5	299.6	467.9	481.9	-	-	-	-	-	423.9	-

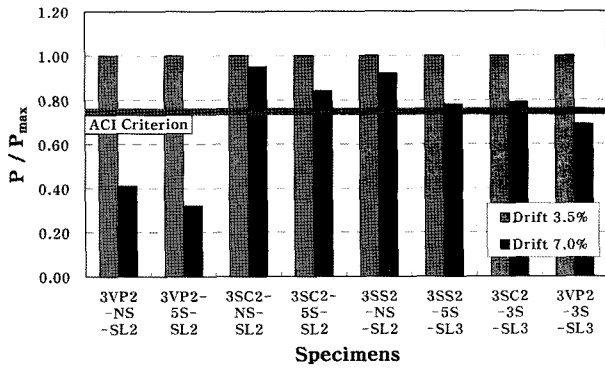


Fig. 7 Strength deterioration ratio

지하기 위하여 drift 3.5%에서 최대 강도의 75% 이상의 강도 성능을 유지하도록 요구하고 있다⁴⁾. 이에 대한 분석 결과는 Fig. 7과 같다. 모든 실험체가 drift 3.5% 이후에 최대 강도를 보였으며 drift 7.0%까지도 강도 저하는 미미하였다. PCS 구조 시스템의 강도 성능은 ACI의 기준을 만족하고 있다.

3.3.2 강성 성능

1) 초기 강성

ACI에서는 구조물의 사용성과 안정성을 확보하기 위하여 층간 변위비를 제한하고 있다. 층간 변위비가 제한

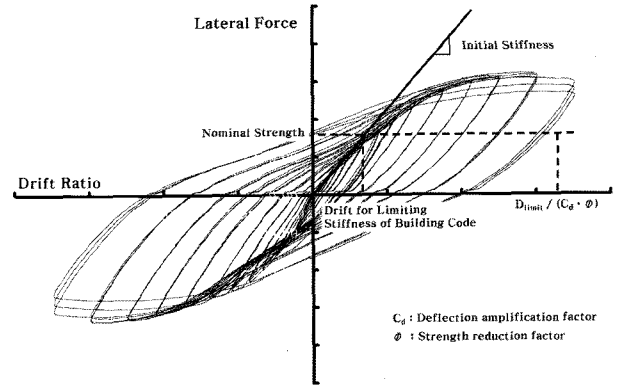


Fig. 8 Initial stiffness limit for ACI criterion

되는 이유는 건물의 초기 강성을 제한하기 위함이다. 지진이 발생하면 구조물은 탄성을 넘어 소성 구간에 도달하게 된다. 이 경우 발생하는 구조물의 변형은 설계자가 생각한 것보다 훨씬 큰 변형을 발생시키고 이는 곧바로 비구조체의 파손뿐만 아니라 P-Δ 효과에 의한 구조물의 붕괴를 가져올 수도 있다.

층간 변위비는 구조물의 강도, 초기 강성, 연성도 등에 의해 결정된다. Fig. 8은 ACI에서 공칭강도 도달시의 층간 변위비로 초기 강성을 제한하는 과정을 보여주고 있다. ACI의 초기 강성 기준은 구조물의 등급에 따른 허

Table 5 Experimental strength results

Specimen	Observed (kN)	Failure mode	Calculated strength (kN)				Observed / calculate			
			Beam	Column	Joint			Observed / beam	Observed / column	Observed / joint
					Panel zone	End plate	bolt			
3VP2-5S-SL2	326.0	Beam	299.6	214.5	294.7	423.9	410.3	1.08	1.52	1.11
3SC2-NS-SL2	376.9		481.9	378.3				0.78	0.99	1.28
3SC2-5S-SL2	321.7		299.6	378.3				1.07	0.85	1.09
3SS2-NS-SL2	379.4		481.9	378.3				0.79	1.00	1.29
3SS2-5S-SL3	346.5		299.6	378.3				1.16	0.92	1.18
	418.1	467.9	378.3	0.89	1.11	1.42				
3VP2-NS-SL2	355.0	Column	481.9	214.5	294.7	423.9	410.3	0.73	1.65	1.20
3VP2-3S-SL3	364.1		372.5	214.5				0.98	1.70	1.24
	368.7		599.5	214.5				0.62	1.72	1.25
3SC2-3S-SL3	316.7		372.5	378.3				0.85	0.84	1.07
	418.6		599.5	378.3				0.70	1.11	1.42

Table 6 Analysis of initial stiffness

Specimen	Nominal strength (kN)	Joint distortion (% rad)	Total drift (% rad)	ACI criterion
3VP-NS-SL2	153.6	0.211	0.755	Seismic use group I < 0.5% II < 0.4% III < 0.3%
3VP-5S-SL2	153.6	0.457	1.001	
3VP2-3S-SL3	153.6	-	0.701	
	-	-	0.838	
3SC2-NS-SL2	191.9	0.717	1.397	
3SC2-5S-SL2	157.0	0.654	1.210	
3SC2-3S-SL3	191.9	-	0.877	
	-	-	1.242	
3SS2-NS-SL2	191.9	0.643	1.3223	
3SS2-5S-SL3	157.0	-	1.040	
	-	-	0.900	

용 층간 변위비 ($\Delta_a / \Phi \cdot C_d \cdot h$)를 넘지 않도록 요구하고 있다⁴⁾. PCS 구조 시스템의 초기 강성 평가 결과는 모두 ACI의 요구 성능을 만족하지 못하고 있다 (Table 6).

PCS 구조 시스템의 초기 강성 성능을 파악하기 위해서 기존의 다른 구조 시스템과의 비교 분석을 실시하였다^{5, 15)}. Fig. 9는 다른 구조 시스템의 실험체와 PCS 실험체의 초기 강성을 비교 분석한 결과이다. 이 결과에 의하면 용접으로 연결된 CFT 구조, RCS 구조, 강구조 및 철근콘크리트 구조는 PCS 구조 시스템보다 우수한 초기 강성을 보유하며, 볼트로 연결된 CFT 구조나, 일반적인 RCS 구조 시스템은 초기 강성이 PCS 구조 시스템과 유사한 것으로 나타났다.

이와 같이 PCS 구조 시스템의 초기 강성은 철근콘크리트 구조나 철골 구조에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 관통형 볼트를 사용하는 대부분의 접합부에서 발생하는 것으로 건식 접합면이 완전히 부착되지 못해서 발생하는 초기 변형에 의한 틈새와 관통형 볼트의 긴장력 부족이 그 원인으로 추정된다. 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

아울러 본 연구에서 분석된 기존의 RC 및 강구조도 ACI의 요구 조건 (0.3~0.5%)에 미치지 못하는 것으로 나타나 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보여 진다.

2) 강성 저하

실험체의 강성은 강도 성능이 클수록 강성 또한 크게 나타났다. 스퀘럽이 설치되지 않은 실험체의 강성이 스퀘럽이 설치된 실험체에 비해 큰 강성을 보였으며, 슬래브가 타설된 실험체의 경우 슬래브가 압축을 받을 때 더 높은 강성을 나타내었다. Drift가 증가할수록 강성은 지속적으로 감소하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다.

높은 수준의 지진이 발생한 이후 zero drift에서의 강성이 너무 작아지면 구조물은 작은 하중에도 큰 변형을 일으켜 불안정한 상태가 된다. 이에 ACI에서는 drift 3.5%의 세 번째 사이클에서 zero drift 강성이 초기 강성의 5% 이상을 유지하도록 요구하고 있다⁴⁾.

Fig. 11은 가력 단계별 zero drift에서의 강성 (K_{n0})을 초기 강성 (K_1)으로 나눈 결과이다. Zero drift에서의 강

성 저하는 슬래브가 타설된 실험체와 비슬래브 실험체 사이에 차이가 있었다. 비슬래브 실험체가 초기 강성을 drift 0.75%까지 유지하다 강성 저하가 일어난 반면 슬래브가 타설된 실험체는 처음부터 강성 저하가 30% 정도 발생했다. 이는 슬래브에 미세균열이 있었으며, 상하 방

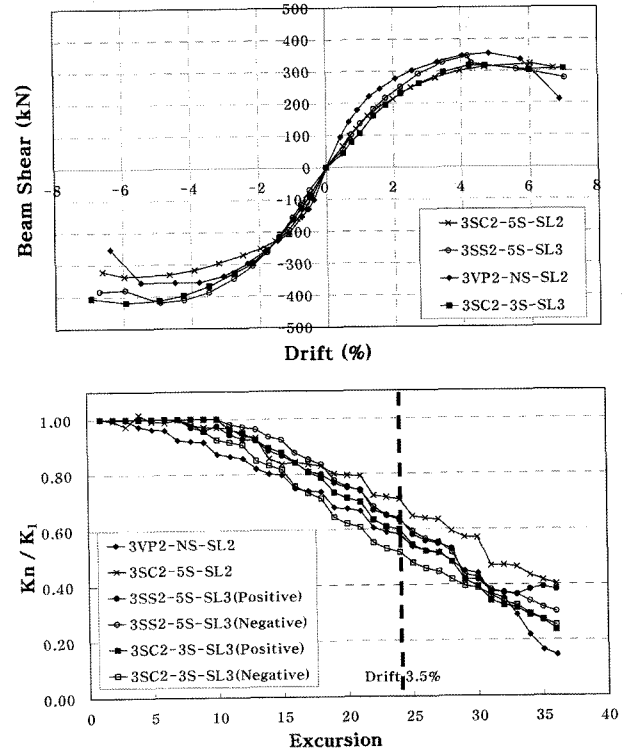


Fig. 10 Force-drift ratio skeleton curves and peak stiffness degradation

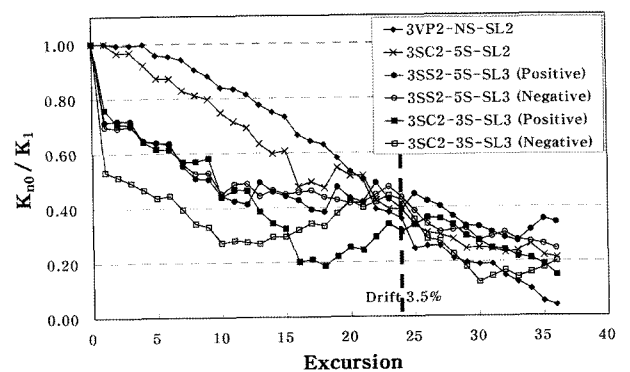
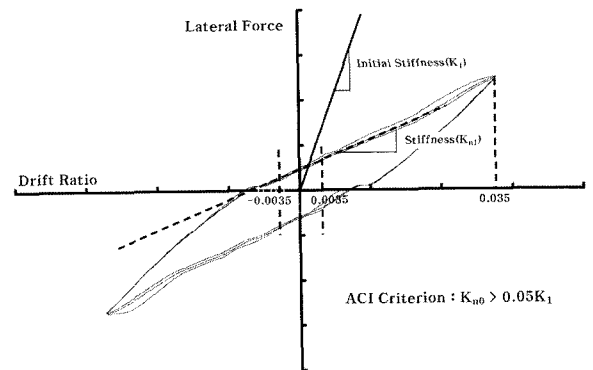


Fig. 11 Stiffness around zero drift ratio of ACI criterion and stiffness degradation analysis

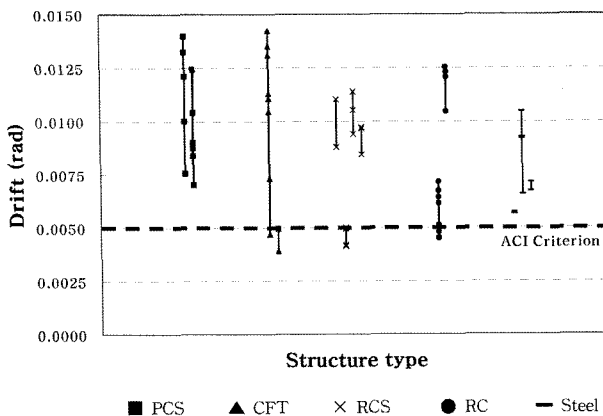


Fig. 9 Analysis of initial stiffness

항의 강성이 서로 달라 처음부터 편칭 현상이 발생했기 때문으로 보인다. 그러나 drift가 증가할수록 비슷한 강성 저하 수준을 보였다.

Drift 3.5%에서의 강성 저하는 60% 정도였으며, 이는 ACI의 강성 저하 기준을 크게 상회하고 있음을 보여준다.

3.3.3 에너지소산 성능

지진 발생시 구조물의 연성 거동은 에너지소산 능력과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그로 인해 에너지소산 능력이 클수록 내진 성능이 우수한 것으로 평가받고 있다. 이에 본 연구에서는 에너지소산 성능을 평가하기 위하여 ACI ITC/T1에서 제시하고 있는 에너지소산율 산정 방법을 이용하였다. Fig. 12는 ACI의 에너지소산율 산정 방법 및 분석 결과를 나타낸 것이다.

ACI에서는 구조물의 안정적인 에너지소산 능력을 확보하기 위하여 구조물 파괴되었다고 가정하는 drift 3.5%의 세 번째 사이클에 대하여 에너지소산율이 1/8을 넘도록 요구하고 있다. 일반적으로 RC를 이용하는 구조 시스템의 경우 drift 3.0%에서 1/4~1/10 수준인 것으로 알려져 있다⁴⁾.

본 연구에서는 drift 3.5%일 때와 drift 7.0%일 때의 에너지소산율을 분석하였다. 모든 실험체가 ACI의 기준을 만족하고 있다. 슬래브가 타설된 실험체는 보와의 합성 정도가 작을수록 높은 성능을 보였다. 슬립 현상이 에너지소산율을 감소시키고 있으며, 기동 손상이 적을수록 에너지소산 성능이 높게 나타났다. 이에 미루어 볼 때 기동 손상에 의한 편칭 현상이 에너지소산 능력을 감소시키는 주된 원인으로 분석된다.

3.3.4 연성도 평가

큰 지진에 대하여 구조물이 전혀 손상을 입지 않는 설계는 현실적으로 거의 불가능하며 경제적인 부담도 매우 크다. 그러므로 구조물은 손상을 입더라도 붕괴되지 않아야 하며 이를 위해서는 구조물이 충분한 연성도를 가지고 있어야 한다.

연성도 분석 결과는 Table 7과 같다. PCS 구조 시스템의 연성도는 5.5 정도인 것으로 확인되었다. 항복강도는 단조 가력 치환 곡선에서 초기 강성 구배를 갖는 직선과 초기 강성의 1/3구배의 직선을 평행이동시켰을 때 발생하는 하중을 항복강도로 정하는 ACI의 제안을 따랐다.

3.3.5 내진 성능 분석 종합

본 연구에서 실시한 내진 성능 실험 결과 PCS 구조 시스템은 초기 강성을 제외한 ACI의 내진 성능 실험 평가 기준인 강도 저하, 강성 저하, 에너지 소산 성능의 모든 기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다 (Table 8).

4. 결 론

본 연구에서는 PCS 구조 시스템의 접합부 내진 성능

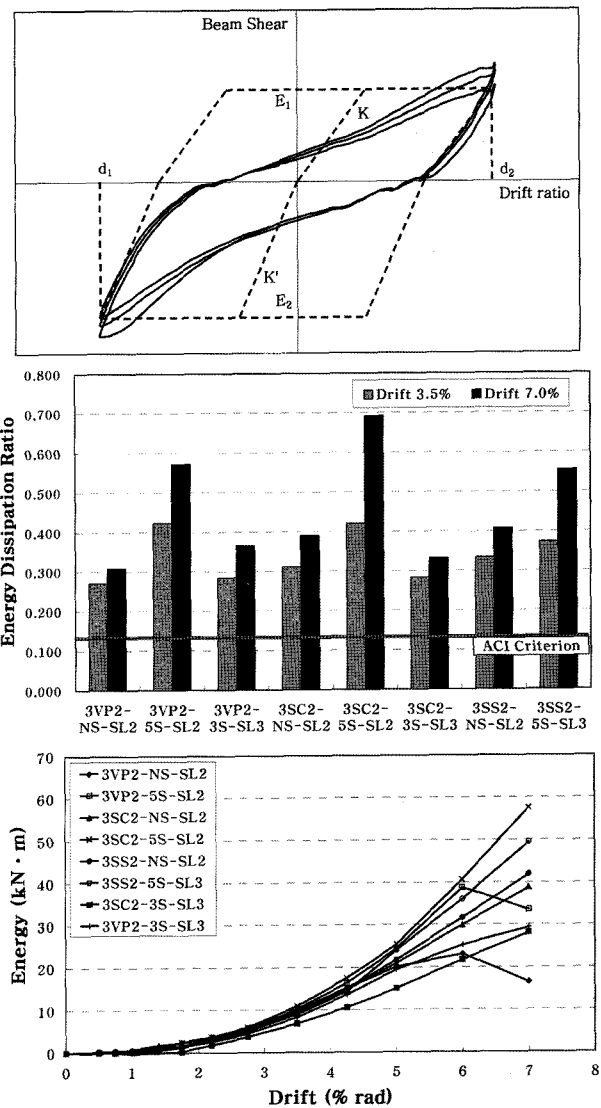


Fig. 12 Energy dissipation computation of ACI criterion and proportion of energy dissipation

Table 7 Analysis of ductility

Specimen	Py (kN)	δy (mm)	δu (mm)	$\delta y / \delta u$
3VP2-NS-SL2	225.6	15.0	103.1	6.89
3VP2-5S-SL2	216.3	20.0	98.1	4.91
3VP2-3S-SL3	168.1	9.4	93.9	9.99
3VP2-3S-SL3	225.3	17.8	93.4	5.25
3SC2-NS-SL2	226.1	19.5	101.8	5.21
3SC2-5S-SL2	215.3	23.4	100.6	4.30
3SC2-3S-SL3	214.3	19.3	95.3	4.94
3SC2-3S-SL3	248.0	16.2	89.6	5.53
3SS2-NS-SL2	270.1	26.3	96.1	3.65
3SS2-5S-SL3	248.9	24.4	100.4	4.12
3SS2-5S-SL3	296.6	25.6	97.1	3.79

을 분석하고 구조적 특성을 파악하고자 반복 하중 내진 성능 실험을 수행하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) PCS 구조 시스템은 특수 철골 모멘트 골조와 특수 철근콘크리트 모멘트 골조 수준의 변위 연성도를

Table 8 Analysis results

	ACI criteria	Drift (%)	3VP2-NS-SL2	3VP2-5S-SL2	3VP2-3S-SL3		3SC2-NS-SL2	3SC2-5S-SL2	3SC2-3S-SL3		3SS3-NS-SL2	3SS2-5S-SL3	
					(P)	(N)			(P)	(N)		(P)	(N)
Strength deterioration (%)	At drift ratio 3.5%, the strength must maintain over than 75% of maximum strength	3.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Initial stiffness (% rad)	Drift ratio do not exceed drift (0.3~0.5% rad) for limiting stiffness of buliding code	7.5	41	32	75	69	95	84	84	79	92	84	78
		-	0.755	1.001	0.838	0.701	1.397	1.210	1.242	0.877	1.323	1.040	0.900
Stiffness degradation (%)	At zero drift ratio, the stiffness must be over than 5% of the initial stiffness	3.0	35.7	44.6	41.4	37.0	24.7	39.1	31.0	42.6	39.8	39.3	43.6
		7.5	3.9	5.0	13.3	23.4	16.0	21.3	15.0	20.0	18.7	34.2	24.7
Energy dissipation (A / A _{square})	At drift ratio 3.5%, the relative energy dissipation ratio must be over than 0.123	3.0	0.270	0.423	0.284		0.311	0.421	0.283		0.333	0.373	
		7.5	0.308	0.572	0.365		0.390	0.692	0.332		0.408	0.555	

확보하고 있는 것으로 판단된다.

- 2) PCS 구조 시스템은 ACI에서 구조물이 파괴되었다고 가정하는 drift 3.5%까지 우수한 내진 성능을 보여주었으며, 더 큰 drift에 대해서도 에너지 소산 능력이 증가하면서 매우 우수한 내진 성능을 가진 것으로 나타났다.
- 3) 슬래브는 강도 및 강성 증가 효과를 보였으나, 파괴모드 조절 및 내진 성능에는 좋지 않은 결과를 나타내었다. 보와 슬래브의 합성 정도가 적을수록 더 우수한 내진 성능을 나타내는 것으로 판단된다.
- 4) PCS 구조 시스템은 다른 구조 시스템에 비해 초기 강성 성능이 낮은 것으로 분석되었으나, 다른 합성 구조의 초기 강성과는 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 이러한 현상의 원인은 다른 합성 구조와 마찬가지로 접합부의 일체성 확보에 어려움이 있었기 때문으로 판단된다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 박순규, “합성 구조의 접합부 개발 현황 및 전망”, 콘크리트학회지, 17권 2호, 2005, pp.22~27.
2. 최병정, 이은택, “지진에 의한 접합부 파괴 유형”, 한국강구조학회지, 14권 4호, 2002, pp.16~21.
3. ACI 352R-91, “Recommendations for Design of Beam Column Joint in Monolithic Reinforced Concrete Structures”, *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 2002, pp.1~9.
4. ACI T1.1R-01, “Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing”, *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 2002, pp.1~7.
5. 전진우, CFT 기둥과 H형강보 관통형 볼트 접합부의 내진성능에 관한 실험적 연구, 울산대학교 석사학위 논문,

- 2001, pp.14~19.
6. L.Y. Wu, L. L. Chung, S. F. Tsai, C. F. Lu, and G. L. Hwang, “Seismic Behavior of Bidirectional Bolted Connections for CFT Column and H-Beams”, *Engineering Structure*, Vol.29, 2007, pp.395~407.
7. A. Elremaily and A. Azizinamini, “Experimental Behavior of Steel Beam to CFT Column Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.57, 2001, pp.1109~1111.
8. Gustavo Parra-Montesinos and Jame K. Wight, “Seismic Response of Exterior RC Column to Steel Beam Connection”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2000, 1117pp.
9. Hiroshi Kuramoto and Isao NishiYama, “Seismic Performance and Stress Transferring Mechanism of Through-Column-Type Joints for Composite Reinforced Concrete and Frames”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2004, 355pp.
10. G. J. parra-Montesinos, X. Liang, and J. K. Wight, “Towards Deformation-Based Capacity Design of RCS Beam-Column Connections”, *Engineering Structure*, Vol.25, 2003, pp.688~689.
11. 최근도, 유영찬, 이리형, “철근콘크리트 기둥 및 철골보로 구성된 복합구조의 접합부 거동에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 논문집, 15권 2호, 2003, 300pp.
12. James O. Jirsa, *Design of Beam-column Joints for Seismic Resistance*, ACI, 1991, pp.208~218.
13. Minehiro Nishiyama, *Seismic Response and Seismic Design of Prestressed Concrete Building Structures*, Department of Architectural Engineering, Kyoto University, 1993, pp.134~135.
14. F. M. Mazzolani, *Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas*, E&FN SPON, New York, 2000, pp.224~242.
15. Egor P. Popov and Shakhzod M. Takhirov, “Bolted Large Seismic Steel Beam to Column Connections Part 1: Experimental Study”, *Engineering Structure*, Vol.24, 2002, pp.1529~1532.

요약 PCS 구조 시스템은 프리캐스트 콘크리트 기둥과 철골보로 이루어진 합성 구조 시스템의 일종이다. 이 시스템은 접합부를 볼트로 연결함으로써 완전건식공법이며 조립식이어서 시공성 및 경제성 면에서 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 실험체를 구성하는 PC 기둥 및 접합부를 개발하였으며, PCS 구조 시스템의 구조적 특성과 내진 성능을 파악하기 위하여 다양한 실험을 수행하였다. 실험 결과 개발된 PC 기둥은 손상 이후에도 강도 성능을 유지하는 우수함을 보였다. 철골보의 스켈럽은 파괴 모드 조절 및 에너지소산 능력에 효율적인 것으로 나타났으며, 단부 평판으로 구속된 접합부는 그 강도 성능이 매우 우수하였다. 타설된 슬래브는 파괴 모드 조절 및 에너지소산 능력에 바람직하지 못한 효과를 보였다. 내진 성능 분석 결과 PCS 구조 시스템은 초기 강성을 제외한 강도 및 강성 저하, 에너지소산 성능의 ACI 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났으며 매우 우수한 것으로 분석되었다. 초기 강성의 경우 PCS 구조 시스템은 다른 합성 구조와 비슷한 수준이었으며, 일반콘크리트 및 철골조도 ACI의 기준을 만족하지 못하는 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 ACI의 초기 강성 평가 기준이 부분 구조 실험체만으로는 만족하는데 한계가 있기 때문이다. 그러므로 본 연구에서 수행된 PCS 구조 시스템은 내진 성능 및 역학적 성능이 매우 우수한 것으로 판단된다.

핵심용어 : PCS 구조 시스템, 내진 성능, 볼트 접합부, 합성구조