

반복 횡하중을 받는 프리캐스트 대형 콘크리트 판구조의 이력특성에 관한 실험적 연구

Hysteretic Behavior of Precast Concrete Large Panel Structures
Subjected to Horizontal Cyclic Loading

서수연*

이원호**

이리형***

Seo, Soo-Yeon Yi, Waon-Ho Lee, Li-Hyung

Abstract

Main objective of this study is to examine the hysteretic behaviors and to evaluate the capacity of precast concrete (PC) large panel structures simulated from the prototype of 15-story building. Two 1/2 scaled precast concrete wall specimens and one monolithic reinforced concrete specimen were designed and tested under the cyclic loading conditions. The main parameter of test specimens in PC large panel structure is the type of details for vertical continuity of vertical steel in horizontal joint. Also the behaviors of PC large panel structures are compared with that of monolithic reinforcement concrete wall structure.

From the results, the stiffness and energy dissipation ratio of the precast concrete specimens are shown little bit lower than those of monolithic reinforced concrete specimen. In the PC large panel structures, the specimen connected vertically by welding (strong connection) showed higher strength than that of the specimen connected vertically by joint box. However the failure pattern of the former showed more brittle than that of the latter due to the diagonal compressive failure of wall panels.

Key words : precast concrete large panel structures, connections, monolithic reinforcement concrete wall structure, vertical continuity

1. 서 론

대형 콘크리트 판 구조는 부재와 부재가 접합부를 통하여 연결되기 때문에 이 부분을 통한 비선형 거동이 예측된다. 이에 따라, 그 거동은 일

체식 철근콘크리트 벽식 구조와는 다소 다른 거동이 예상되지만, 그 거동특성은 접합부의 연결방식에 따라 차이가 있기 때문에, 이를 명확하게 제시하기 위해서는 실험 및 이론적인 연구를 통한 규명이 필요하다. 현재 국내에서는 1992년 대형

* 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

** 정회원 광운대학교 건축공학부 교수

*** 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

콘크리트 판구조에 대한 규준¹⁾이 제정되어 있는 상황이다. 이 규준에 의하면, 대형 콘크리트 판구조의 구조해석시는, 일체식 구조로 가정하며, 반응수정계수는 일체식과 동일하게 적용하도록 규정하고 있다. 그러나, 미국의 NEHRP 97²⁾규준의 경우, 접합부 부위의 하중-변형 관계를 실험과 해석적인 모델링으로부터 규명하지 않았을 경우에는 저감된 반응수정계수와 변형계수를 사용하도록 정하고 있다. 이는 프리캐스트 콘크리트의 특성인 접합부 부위를 통한 구조물의 약화를 고려한 것이라 할 수 있다.

본 연구의 목적은 현재 국내에서 적용하고 있는 대표적인 프리캐스트 대형 콘크리트 판구조의 횡하중에 대한 거동특성을 파악하는 것이다. 이를 위하여 연결형식이 다른 2개의 대형 콘크리트 판구조체와 1개의 일체식 철근콘크리트 판구조체를 제작 및 실험후, 비교분석하여 프리캐스트 대형 콘크리트 판구조의 반복하중에 대한 이력특성을 파악하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

실험체는 실제 15층 아파트 건물의 임의 부위 중 최하부 3개층 부위를 1/2 축소 모델링하였으며, 주 연구내용은 대형 콘크리트 판구조와 일체식 철근 콘크리트 벽식 구조와의 거동차이, 수평접합부에 있는 수직보강철근의 연결방식에

따른 차이이다. 실험체 형상은 수평 접합부와 수직 접합부의 조합으로 이루어지도록 계획하였다. 그 형상은 Fig. 1, 접합부 형태는 Fig. 2와 같고 실험체의 상세 일람은 Table 1과 같다.

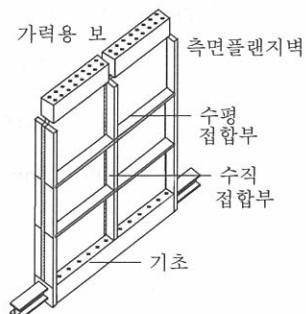
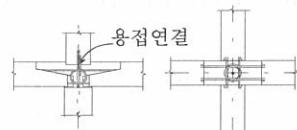


Fig. 1 실험체 형상



(a) QE3-14A 실험체



(b) QE3-14B 실험체

Fig. 2 접합부 상세

Table 1. 실험체 일람

실험체명	높이 (mm)	길이 (mm)	사용 철근 (mm)					조인트 박스 (mm)	전단기 (mm)	축응력 (kgf/cm ²)
			벽	슬래브	L.B.	V.T.B	S.B.			
QE3-14A	3900	4000	Φ3-100X100	Φ3@50	Φ 5	HD10	1-HD7	용접 이음	40x70	21.43
QE3-14B	3900	4000	Φ4-100X150	Φ3@50	Φ 4	HD13	1-HD7	60x72.3x50-0.6	50x70	21.43
QR3-14	3900	4000	Φ3-100X100	HD7@150	Φ 5	-	-	-	-	21.43

Q E 3 - 14 A
 ┌─────────┐
 └─────────┘
 수직 보강철근의 연결방식 (A : 용접연결, B : 조인트박스 연결)
 벽두께 (Full Scale 일때의 값)
 층 수 (3층)
 수직접합부 형식 (E형), R은 일체식 철근콘크리트조
 Quasi-Static

* L.B. : Loop Bar, V.T.B. : Vertical Tie Bar, S.B. : Strand Bar

2.2 재료시험 결과

벽판 및 슬래브 판을 구성하는 기본적인 요소인 콘크리트, 테두리근, 수직보강철근, 용접철망, 조인트 박스, 루프철근, 전단키의 형태 등은 1/2의 축척에 맞도록 그 규격을 조절하였다. 콘크리트 및 모르터의 재료시험을 통하여 나타난 각 재료의 28일 압축강도는 Table 2와 같으며, 철근 및 용접철망의 인장강도는 Table 3, 4와 같다.

Table 2. 콘크리트 및 모르터의 압축강도 단위 : kgf/cm²

구 분	실험체명	QE3-14A	QE3-14B	QR3-14
PC 판		289	288	226
수직접합부		298	260	-
수평접합부		244	275	-
조인트 박스 총전모르터		247	488	-

Table 3. 철근의 인장강도

구 분	항 복 시		σ_u (kgf/cm ²)
	σ_y (kgf/cm ²)	ϵ_y ($\times 10^6$)	
$\phi 4$	4694	3299	5020
$\phi 5$	4622	4208	5405
HD7	4717	2006	5228
HD10	3102	2083	4293
HD13	5284	3205	6304

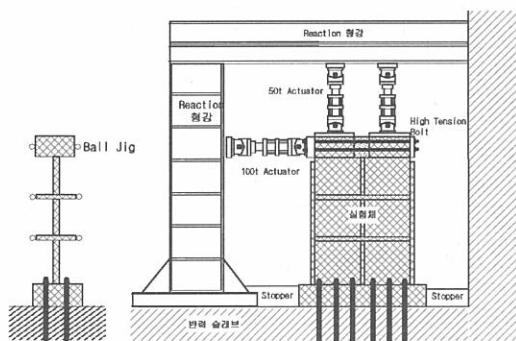


Fig. 3 실험체 설치상황

Table 4. 용접철망의 재료특성 단위 : kgf/cm²

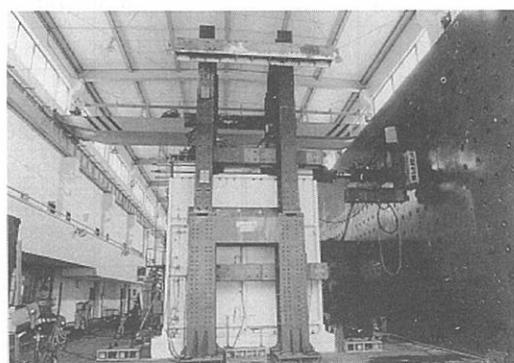
시험 항목	$\Phi-4 \times 100 \times 150$	$\Phi-3 \times 100 \times 150$
인장강도	6900	7500
용접점 전단강도	4100	4500

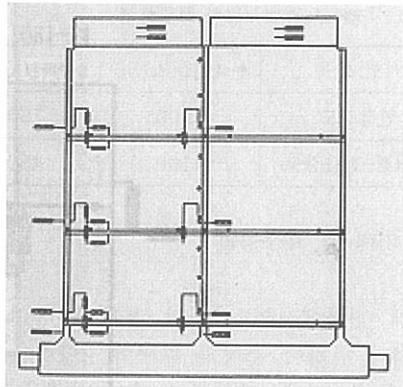
2.3 가력 및 측정방법

실제 건물에서의 상황과 동일한 응력상황을 재현하기 위하여 축력과 횡력의 2방향 가력 실험을 하며, 또한, 실험체의 면외 변형을 방지하기 위하여 가력용 보의 측면과 각 층 슬래브에 베어링을 설치하여 실험체가 길이방향으로만 변형되도록 하였다. 상세한 실험체의 설치상황은 Fig. 3과 같다.

변형을 측정하고자 계획한 각 실험체의 부위는 기본적으로 수직 접합부의 미끄러짐과 벌어짐, 수평 접합부의 미끄러짐과 들림, 층간변위 그리고 실험체의 전체변위, 조인트 박스내 수직보강철근의 변형, 수직접합부내의 루프철근 변형 등이다. 이에따라 모든 실험체의 LVDT와 스트레인 게이지를 Fig. 4와 같이 설치하였다.

실험체의 횡방향 가력은 초기에는 하중조절에 따라 가력하였으며, 항복하중 이후에는 변위조절로서, 항복변위의 배율로 각 단계별 2싸이클로 점증 가력하였다. 변위 조절시에 사용한 제어용 LVDT는 가력용 보에 설치된 2개 LVDT





● : 스트레인게이지
Fig. 4 스트레인게이지 및 LVDT 설치위치

측정값의 평균값으로 하였으며, 수시로 각 부위의 균열상황 및 각 계기의 변형정도를 관찰하면서 실험을 진행하였다.

3. 실험결과

각 실험체의 실험결과 나타난 항복내력, 최대내력, 그리고 균열발생시의 횡력과 변위 값을 나타내면 Table 5와 같으며, 파괴양상 및 하중-변위 곡선, 변형도 등은 다음과 같다.

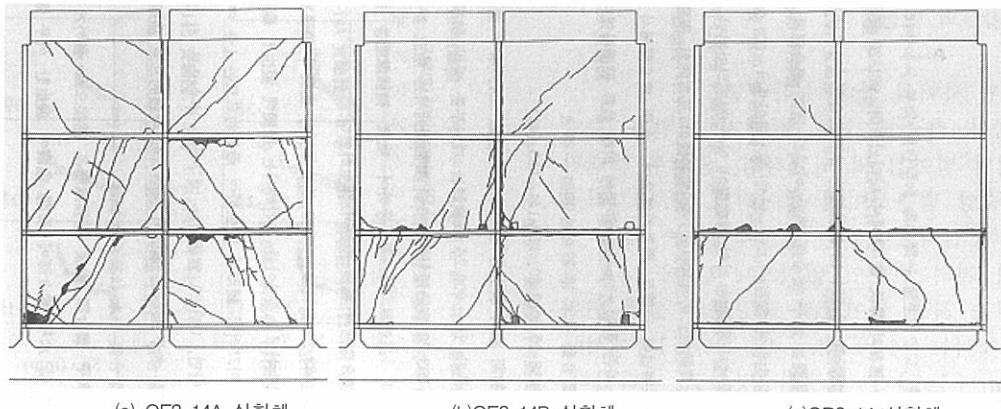
3.1 균열 및 파괴상황 (Fig. 5)

QE3-14A 실험체는 수평접합부 수직 보강 철근을 용접으로 강하게 연결한 실험체로서, 그 파괴상황은 수직 및 수평 접합부에 초기 균열이 발생한 이후, 횡변위가 2.84mm 부근에서부터 벽판넬에 사균열이 발생하였고, 벽판넬의 사압축 파괴에 의해 최종 파괴되었다. 반면에 조인트 박스로서 수직보강철근이 연결된 QE3-14B 실험체는 수평접합부에서 초기 균열이 발생한 이후 파괴가 비교적 심각하게 진행되었으며, 횡변위 9.69mm에서부터는 벽판넬에 사균열 및 인장에 의한 수평균열이 발생하였다. 일체식 철근 콘크리트 구조인 QR3-14 실험체의 파괴상황은 반복되는 수평력에 의해 1층 벽판이 사압축 파괴되는 양상을 초반에 보이다가 싸이클이 계속됨에 따라 2층 벽판과 2층 슬래브 사이의 수평 방향 미끄러짐이 두드러지게 나타났으며, 최종적으로는 1층 측면의 플랜지 벽판이 미끄러져 나감으로써 파괴에 도달하였다. 실험 종료시의 파괴상황은 1층 벽판의 밀려나감 파괴, 2층 슬래브와 2층 벽판사이에서의 미끄러짐 파괴가 나타났다.

Table 5. 실험결과 일람

실험체명	층 수	축응력 (kgf/cm ²)	전 단력 (tf)										횡변위 (mm)				
			(1)	n	(2)	n	(3)	n	(4)	n	(5)	n	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
QE3-14A	3	21.43	17.6	7	39.0	19	26.1	11	36.5	17	50.2	28	1.01	5.46	1.91	4.55	10.19
	2				15.9	9	26.1	11	33.7	15				0.92	1.91	3.54	
	1				15.9	9	-	-	33.7	15				0.92	-	3.54	
QE3-14B	3	21.43	17.2	7	29.0	37	35.6	21	29.0	37	38.6	19	0.91	14.34	6.82	14.34	6.39
	2				33.7	35	32.7	11	36.9	13				13.03	2.68	3.69	
	1				36.9	13	26.5	9	32.8	12				3.69	1.77	2.75	
QR31-4	3	21.43	26.2	10	-	-	-	-	-	-	47.7	22	1.00	-	-	-	6.35
	2				-	-	39.4	14	-	-				-	2.65	-	
	1				46.9	20	33.4	12	43.4	16				5.37	1.79	3.82	

(1) 항복하중, (2) 수직접합부 초기균열하중, (3) 수평접합부 초기균열하중, (4) 벽 사균열하중
(5)최대하중 (6),(7),(8),(9),(10) 각 하중에 대한 변위를 나타냄. * n은 싸이클을 나타냄.



(a) QE3-14A 실험체

(b) QE3-14B 실험체

(c) QR3-14 실험체

Fig. 5 실험체 균열상황

3.2 하중-변위곡선 (Fig. 6)

QE3-14A 실험체의 기본적인 이력거동은 초반 싸이클에서 강도의 증가가 QE3-14B 실험체에 비하여 비교적 크게 나타난 반면에 최대하중 이후에 강도저하가 급격하게 나타났다. 이는 수평 접합부가 강하게 연결됨에 따라 벽판에 많은 변형이 집중되어 싸이클 후반부에 벽판이 급격히 사압축과괴됨에 따른 것으로 보여진다. QE3-14B 실험체는 초반에 전단과 축력에 의한 전단마찰 거동, 그리고 후반에서는 휨 거동을 보임에 따라 최대 하중이후 내력이 감소하다 다시 증가하는 이력형상을 나타내었다. 초기 균열 하중은 QE3-14A 실험체와 QE3-14B 실험체는 거의 유사한 17.6t, 17.2t으로 나타났다. QR3-14실험체의 하중-변위 곡선은 PC 실험체와 달리 하중 반전 후에도 전단에 의한 쪼그라짐(핀칭)이 없으며, 실험 종료시까지 강도의 저하도 심각하게 나타나지 않는 안정된 이력거동을 보였다. 이 실험체의 항복 하중은 26.16t이었고, 이때의 변위는 1.0mm였으며, 싸이클이 진행됨에 따라 계속하여 하중은 증가하였지만, 약 2.6cm의 변위에서부터 그 증가율은 다소 둔화되어 변위 6.35mm에서 최대하중에 도달하였다. 이때의 하중은 47.68t이며, 최대하중 이후에도 급속한 강도의 저하없이 최종 파괴시까지 안정된 이력거동을 보였다.

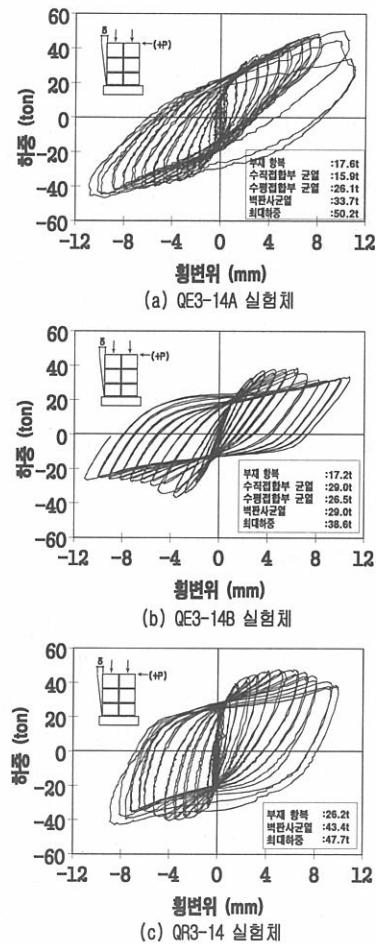


Fig. 6 각 실험체의 하중-횡변위 곡선

3.3 접합부의 변형

1) 벽판 사이의 상대 수직변형

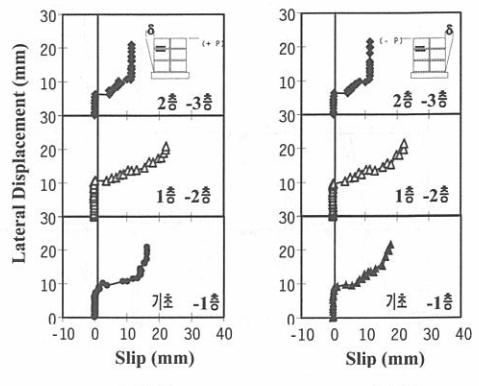
실험체의 좌측에 있는 플랜지 벽판과 중앙 벽판사이의 벌어짐 및 미끄러짐, 중앙부 플랜지 벽판과 중앙 벽판사이의 벌어짐과 및 미끄러짐을 측정한 결과, 대부분 실험체에서는 최종 싸이클까지 거의 변형이 없었으나 QE3-14A 실험체에서는 최종 싸이클시 중앙부의 상대 변위가 2층에서는 4.85mm ($\downarrow \uparrow$), 1층에서는 4.27mm ($\uparrow \downarrow$)가 발생한 것으로 나타났다. 이는 QE3-14A 실험체가 2층 수직 접합부에서 파괴되었기 때문에 나타난 것으로 보여진다.

2) 수평 접합부 미끄러짐 변형 (Fig. 7)

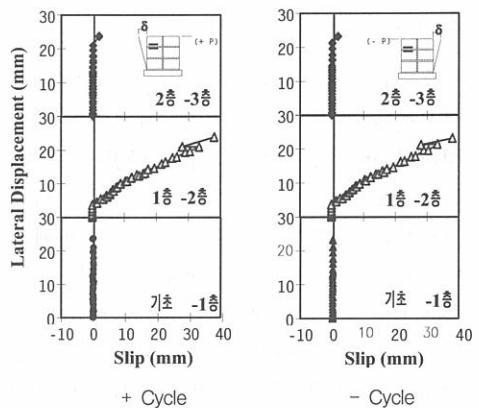
상·하벽의 수직 보강철근이 용접으로 강하게 연결된 QE3-14A 실험체의 수평 접합부 미끄러짐 변형은 각 층에서 비교적 고르게 나타났으며, 최대 하중시인 횡변위 10mm 전후에서부터 나타났다. 반면에 조인트 박스로서 연결된 QE3-14B 실험체는 2층 수평 접합부에 미끄러짐이 집중되어 나타났고, 초반 싸이클 부터 변형이 발생하기 시작하여 최대 38mm에 달하는 변형을 보였다. RC 실험체인 QR3-14 실험체도 QE3-14B 실험체와 마찬가지로 2층 수평 접합부에서 변형이 집중되는 것으로 나타났다.

3.4 층간 변위

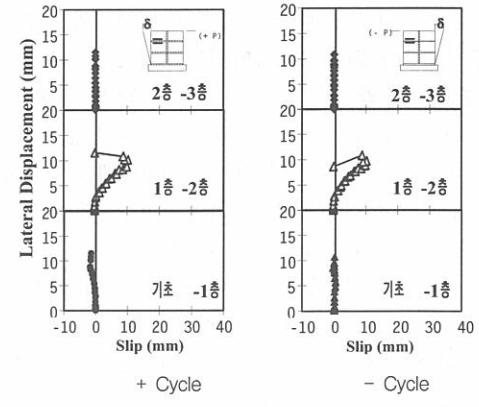
실험체의 각 층변위를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림으로부터 실험체가 모두 2층에서 불규칙 변형을 보였음을 알 수 있다. 이러한 현상은 실험체가 전단거동을 보임에 따라 벽판에 사균열이 발생하거나, 접합부에서 미끄러짐 변형이 심해짐에 의하여 나타난 것으로서, 주된 파괴가 발생한 2층에서 나타나고 있다. 특히, PC 실험체는 2층 수직 접합부 하부에서 많은 변형이 발생한 것으로 나타나, 이 부위에서의 변형에 의한 원인도 있는 것으로 나타났다.



(a) QE3-14A 실험체



(b) QE3-14B 실험체



(c) QR3-14 실험체

Fig. 7 수평접합부의 변형

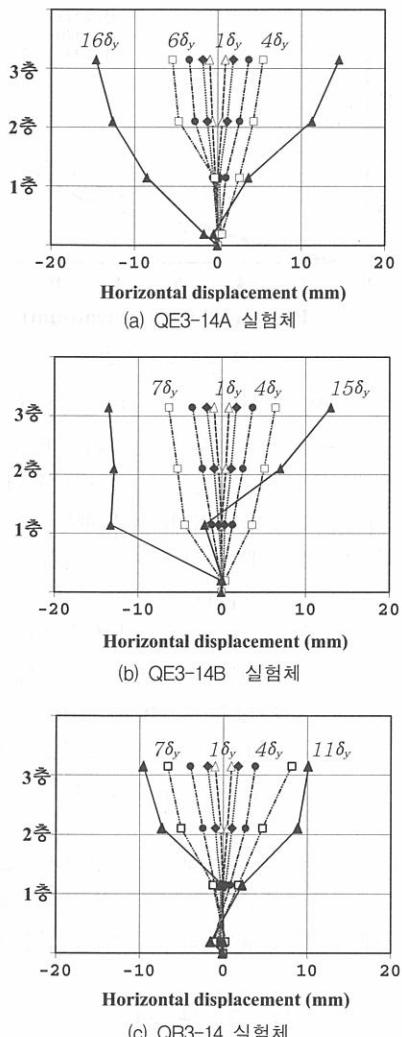


Fig. 8 실험체의 층간변위

4. 실험결과의 비교, 분석

4.1 최대강도

Fig. 9는 각 실험체의 강도를 비교하여 나타낸 것으로서, RC 실험체가 전체적으로 초기강도가 높음을 알 수 있다. 부재 항복시의 강도는 QR3-14 실험체가 26.16t인데 비하여 QE3-14A

실험체는 17.6t, QE3-14B 실험체는 17.2t으로 나타나, PC 실험체의 강도가 RC 실험체 강도의 66%에 달하는 것으로 판단할 수 있다. 이때의 변위는 RC 실험체가 0.34mm이며 QE3-14A 실험체가 1.01mm, QE3-14B 실험체가 0.91mm로서, 각각 QR3-14 실험체의 2.97배, 2.68배로 나타났다. 최대강도에 대해서는 RC 실험체가 47.68t이며 QE3-14A 실험체가 50.2t, QE3-14B 실험체가 38.6t으로 QE3-14A 실험체의 강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, QE3-14B 실험체는 QR3-14 실험체 강도의 약 80% 정도로 나타났다. 이때의 변위는 QE3-14A가 RC 실험체에 비하여 약 2배의 변형을 보였으며, QE3-14B는 약 1.3배의 변형을 보였다.

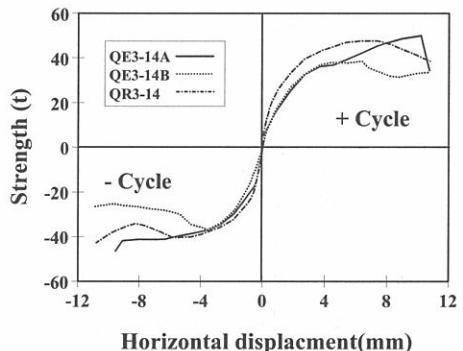


Fig. 9 실험체의 강도변화

4.2 강성변화

각 실험체의 강성변화를 나타내면 Fig. 10과 같다. 그림에서 초기강성은 QR3-14가 가장 높으며, QE3-14A, QE3-14B의 순으로 강성이 높은 것으로 나타났다. 또한 부재 항복시에는 QR3-14에 대한 QE3-14A의 루프강성이 0.96배, QE3-14B는 0.83배로 나타났다. RC 실험체의 최대변위인 횡변위 10mm일 때를 비교하면, 수직 보강철근의 연결방식이 용접연결인 QE3-14A의 강성이 QR3-14에 비하여 1.1배 높게 나타났으며, QE3-14B는 0.74배의 루프

강성을 보여, 수평접합부를 강하게 연결한 용접연결형 실험체의 값이 가장 높은 것으로 나타났다.

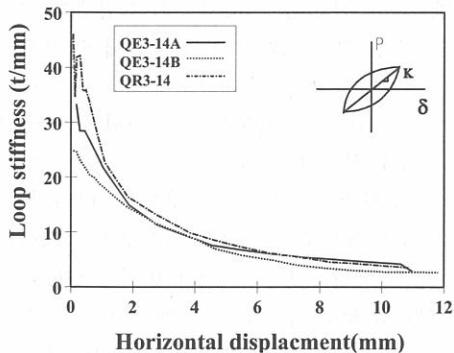


Fig. 10 실험체의 강성변화

4.3 에너지 소산면적

싸이를 진행에 따른 각 실험체의 에너지 소산면적 변화를 나타내면 Fig. 11과 같다. 전체적으로 안정된 이력거동을 보인 RC 실험체가 PC 실험체에 비하여 에너지 소산성능은 높은 것으로 나타났다. PC 실험체간의 에너지 소산성능을 비교하면, 횡변위 13mm 일때까지 거의 유사한 것으로 나타났다. 부재 항복시의 에너지 소산면적은 RC 실험체가 21.3t.mm인 반면에 QE3-14A는 9.7t.mm, QE3-14B는 6.1t.mm로 나타나, 각각 RC 실험체에 대해, 46%, 29%를 보였다. 그러나, 횡변위 10mm인 경우에는 RC 실험체의 에너지 소산면적에 대해서, QE3-14A는 87%, QE3-14B는 75%를 보여, 그 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

1) 일체식인 RC 실험체와 PC 구조의 파괴양상은 접합부의 부분적인 미끄러짐 변형과 벽판의 사압축 전단파괴로서 거의 유사한 상황을 보이고 있는 것으로 나타났다.

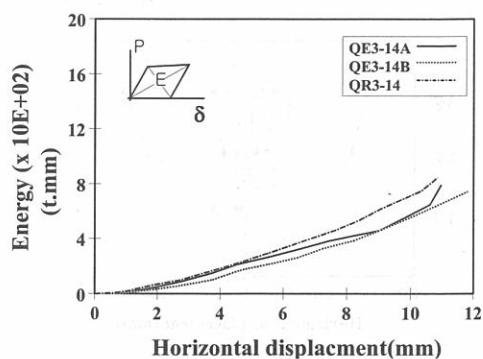


Fig. 11 단계별 소산에너지 변화

2) 하중-변위 곡선상에서 나타난 초기 루프 강성은 PC 실험체가 RC 실험체의 96%(용접연결), 83%(조인트박스연결)로 나타났으며, 횡변위 10 mm($R=2.5/1000\text{rad}$)일때의 루프 강성은 각각 RC 실험체의 110%(용접연결), 74%(조인트박스연결)로 나타났다.

3) 에너지 소산능력은 부재항복시 PC 실험체가 RC 실험체의 46%(용접연결), 28%(조인트박스연결)로 나타났으며, 변위 10mm일 때에는 87%(용접연결), 75%(조인트박스연결)로서 PC 실험체가 낮은 것으로 나타났다.

본 연구는 초대형 구조시스템 연구센터와 현대건설(주), 현대산업개발(주), 동서산업(주)의 공동연구에 의해 수행된 연구결과 중 일부임.

참 고 문 헌

1. 건설부, “프리캐스트 콘크리트 조립식 건축 구조설계기준 및 해설”, 1992.
2. Building Seismic Safety Council, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures”, National Earthquake Hazard Reduction Program, Washington, D.C., 1997
3. 서수연, “대형 콘크리트 판구조의 이력거동에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위 논문, 1995 12.