

C형 접합부를 이용한 프리캐스트 전단벽 시스템에 관한 연구

Precast Shear Wall Systems with C Type Connections

홍성길*

임우영**

Hong, Sung Gul

Lim, Woo Young

ABSTRACT

This thesis investigates the behavior of precast wall systems with a new vertical connection which are proportioned by the displacement based design. The proposed precast wall systems are supposed to provide additional spaces and seismic strengthening in remodeling existing residential buildings. For a fast remodeling constructions using PC walls require an efficient, economic fabrication method. A C-type vertical connections for PC wall systems is proposed for transfer of bending moment between walls in the vertical direction while a shear key in the center of wall is prepared to transfer shear forces by bearing. The proposed vertical connection allows us easy fabrication because of different direction of slots at the edges of wall. The dimension of C-type connection components are determined by engineering models and a series of test.

1. 서 론¹⁾

PC벽체의 경우 접합부의 성능이 벽체 전체의 성능을 좌우하며 RC 벽체와는 다른 거동형태를 나타낸다. PC벽체는 전체 벽체가 일체형으로 거동하지 않고 Gap Opening, Shear Slip, Sliding 등 여러 가지 문제점을 나타내며 거동한다. PC제품의 특성상 시공성 및 사용성 등이 우선적으로 고려되어야 할 것이며 이후에 구조적인 측면을 검토하여 접합부에서의 전단과 휨에 대한 강도를 확보해야 한다.

RC 벽체와 마찬가지로 PC 벽체에서도 내진성능을 위한 연성도를 확보하는 것 또한 중요한 요소이다. 따라서 접합부 및 벽체 내 에너지 소산능력 향상에 대한 방안도 고려되어야 한다.

본 연구에서는 기존에 연구된 접합부를 개량한 C형 접합부를 이용하여 조립한 PC벽체 시스템에 관해 기존 RC 벽체와 비교 분석하여 벽체의 구조성능과, 에너지 소산능력, 벽체 휨철근의 항복 여부 등에 대해 알아보고 이를 T형 벽체에 확대 적용하여 그 거동을 살펴보고자 한다.

2. 기존연구

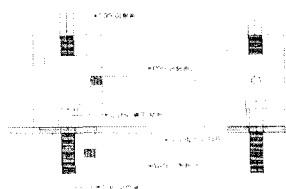


그림 1. 한준희 모델

고강도 볼트를 이용한 건식접합을 연구한 한준희(서울대학교 건축학과 공학석사, 2005) 모델의 경우 상하부패널과 기초 접합부는 고강도 볼트의 마찰접합을 기본 개념으로 설계하였으며 하부 패널 내의 휨철근이 먼저 항복하여 그 부근에서의 균열과 파괴를 유도하는 것이 개발목표였다. 하지만 실험결과 볼트의 인장 소성변형으로 인해 벽체의 성능이 저하되었으며 벽체 휨철근의 항복유도에 실패하였다.

* 서울대학교 건축학과, 부교수

** 서울대학교 건축학과, 석사

3. 접합부 개발

본 접합부의 성능을 확보하기 위한 기술적인 구성으로서 본 접합부는 공장 제작시 C형 철물을 세로주근과 가로 주근으로 접합된 상태에서 타설, 일체화를 도모하고 이후 하부 벽체에 접합 시 C형 철물 아래 부분에 나 있는 구멍을 통해 하부벽체 세로 주근을 통과시키도록 한다. 이후 구멍의 방향이 반대인 또 다른 C형 철물을 추가로 긴결한 뒤 위, 아래 주근에 너트를 끼워 조립을 완성한다. 완성된 벽체는 볼트 접합과는 달리 서로 엇갈리게 끼운 C형 철물 사이에서 상·하부 벽체의 주근을 직접 연결하게 된다. 이는 PC 벽체에서 발생하는 중요한 현상 중 하나인 슬립현상과 Gap Opening을 방지 할 수 있고 전체 거동도 Monolithic 하게 된다.

본 접합부의 경우 C형 철물의 성능이 벽체 전체의 거동을 지배하게 된다. 즉, 주철근이 항복하기 전까진 적어도 철물이 항복을 해서는 안되며, 변형 또한 일어나서는 안된다는 가정이 성립된다. 따라서 벽체에 접합되는 철물보다 현장에서 끼우는 철물이 훨씬 두꺼워야 한다. 이는 축력이나 횡력이 발생할 때 발생하는 철물 면내의 좌굴을 방지하기 위함이다.

본 접합부는 시공성능을 가장 큰 주안점으로 삼고 개발한 것으로 이미 접합되어 있는 철물에 또 다른 철물을 접합시킴으로써 완전한 접합체를 이룬다. PC 제품을 이용한 시공에서 가장 큰 문제점으로 지적되어 온 접합부 구멍 위치와 철근 위치의 부정확성으로 인한 시공의 어려움을 덜고 자 가로 방향으로 뚫려져 있는 구멍을 통해 좌우측 철근 위치의 오차를 허용하고 세로 방향으로 뚫려져 있는 구멍을 통해 앞뒤 오차를 허용하게 되는 시스템을 가진다.

현장 시공시 하나의 벽체에 너트 네 개만을 조임으로써 한층 벽체가 완성됨으로 시공속도가 매우 빠른 이점을 가지고 있다.

SS400의 철제 철물을 C형으로 만든 후 나사선이 있는 이형철근과 조립하고, 상부 벽체 휨철근을 미리 벽체 외부에 부착해 놓은 철물에 관통시킨다음 너트 조임을 한다. 이후 하부 벽체에 조립시 아래에 뚫려있는 두가지 방향의 구멍을 통해 하부 벽체 상부로 튀어나온 하부 벽체 휨철근을 너트로 연결시킨다. 이 때 벽체의 휨거동을 제어하기 위해 추가로 C형 철물을 제작하여 하부 벽체 연결 시 미리 부착되어 있던 철물과 반대방향으로 끼워넣은 채 아래 위 너트를 조인다. 이로 인해 횡력에 의해서만 철근이 항복하게 되고, C형 철물은 계산된 값보다 충분한 단면의 크기로 제작하여 탄성영역상태에 존재하게 한다.

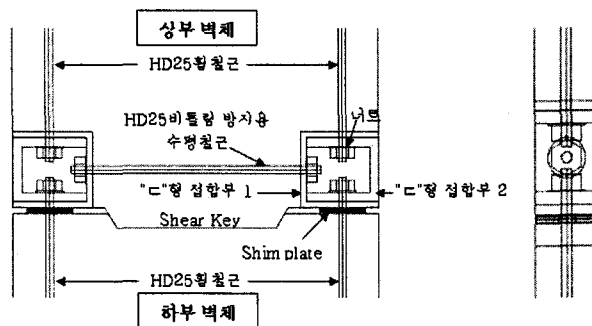


그림 2. C형 철물을 이용한 접합부 상세

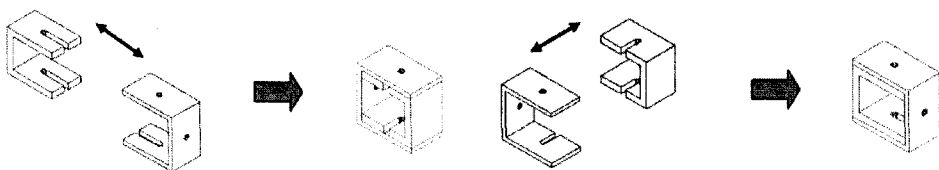


그림 3. 개발 접합부 형태 및 긴결 순서

4. T형 벽체 확대 적용

각각의 벽체는 공장제작 PC제품으로 만들고 현장에서 조립하는 방식을 취한다. 서로의 벽체가 만나는 부분에 거푸집을 대고 현장에서 콘크리트를 타설하는 방식으로 기초부에 매설된 커플러에 현장 시공될 수직철근을 끼운 다음 1방향 벽체를 위에서부터 끼워넣는 방식으로 기초부에 정착될 수 있도록 한다. 이후 2방향 벽체를 옆에서 끼워넣은 뒤 철근들을 모두 결속시킨다. 결속 후 접합부 옆면에 거푸집을 대고 콘크리트를 현장 타설하여 접합부 연결을 완성한다.

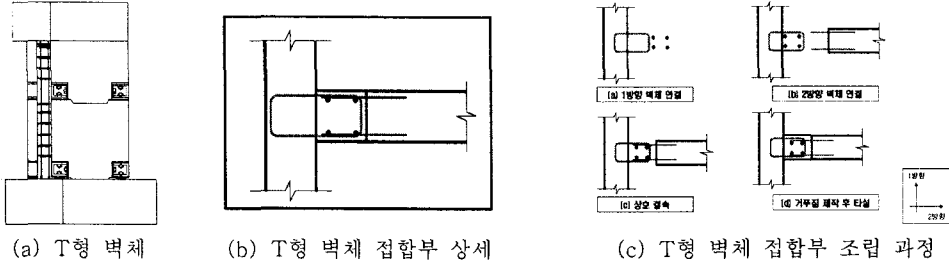


그림 4. T형 벽체 확대 적용

5. C형 접합부를 이용한 PC 전단벽의 실험적 연구

5.1 실험체 계획

본 연구를 위한 실험체 계획시 실험여건상 실제 구조물의 약1/3의 스케일로 제작하였다. 실험체는 상부가력보, 벽체, 기초의 세 부분으로 구성된다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 40MPa로 하였으며 철근은 벽체 연결 휨철근은 HD25, 기초부 연결철근은 HD32를 사용했으며, 벽체내 온도철근은 HD10, HD13을 사용하였다. 그리고 접합부 철물은 SS400인 것을 사용하였다.

5.2 실험체 설계 및 제작

일반적으로 구조물 층고가 높아질수록 벽체의 전단력이 증가함에 따라 하부벽체에 전단력이 급격히 증가하게 되는데 이러한 전단력에 견딜 수 있는 벽체의 설계를 위해 상·하부 벽체에 대각선 철근을 두어 벽체에 가해지는 전단력을 흡수할 수 있도록 하였다. T자형 벽체의 경우도 같은 개념이다. 변수설정에 따른 실험체 형상은 아래 그림 5와 표 1과 같다.

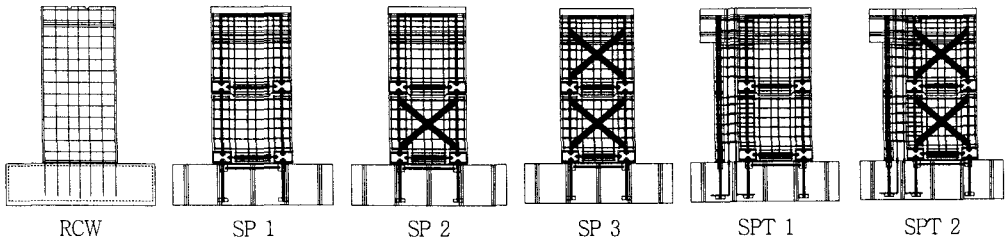


그림 5. 실험체 형상

표 1. 실험체 명칭 및 변수 설정

명칭	변 수	전단철근 유무
RCW	일체 타설 벽체	X
SP 1	개발 접합부를 이용한 기본 벽체	X
SP 2	X자형 전단철근 배근	하부 벽체
SP 3	X자형 전단철근 배근	상하부벽체
SPT 1	기본 벽체로 이루어진 T형 벽체	X
SPT 2	X자형 전단철근 배근된 T형 벽체	상하부벽체

5.3 접합부 Sample Test

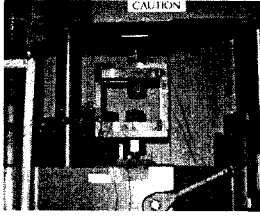


그림 6. 접합부 Sample Test

접합부 Sample Test 결과는 아래 표 2와 같다. 세 번의 Sample Test를 통해 최적의 접합부 두께와 주근 크기, 그리고 너트의 크기를 알아낼 수 있었다. 접합부 철물에 관한 특별한 설계식이 없으므로, 기본 가정(벽체 내 휨철근이 항복하고, 최종 파괴되기 전까지 접합부 철물의 변형은 절대 일어나지 않는다)에 충실하여 반복된 실험을 통해 최적의 값을 찾았다.

표 2. Sample Test 결과

구 분	내측 철물 두께 (mm)	외측 철물 두께 (mm)	이형 철근	피치	결 과	Max. Load (kN)	Max. Displ. (mm)	비고
Sample #1	15	15	HD35	1p	<ul style="list-style-type: none"> •접합부 좌굴 •접합부 용접부 파괴 •철근 항복 안함 	200	118.5	×
Sample #2	15	30	HD25	1p	<ul style="list-style-type: none"> •접합부 변형 없음 •나사산 파괴로 인한 철근항복 유도 실패 	-	-	×
Sample #3	15	30	HD25	1.5p	<ul style="list-style-type: none"> •접합부 변형 없음 •나사산 파괴 발생하지 않음 •철근 항복 	270	62	선택

5.4 실험체 가력 및 계측계획

기초부분과 하부벽체 그리고 상부벽체로 구성된 하나의 PC 벽체를 200ton Actuator를 사용하여 횡방향 반복하중을 가하여 접합부의 강도 및 전체적인 구조물의 거동을 측정한다. 상부 가력보 부분에 줄변위계를 설치하여 벽체 전체 변위를 측정하였으며, 하부 벽체의 slip을 측정하고, 수직변형도를 측정하기 위해 LVDT를 추가로 설치하였으며, 벽체내 변위를 측정하기 위해 대각선으로 줄변위계를 설치하였다. 조립시 상·하부 벽체의 수평도 보정을 위해 벽체간 20mm간격을 두었다.

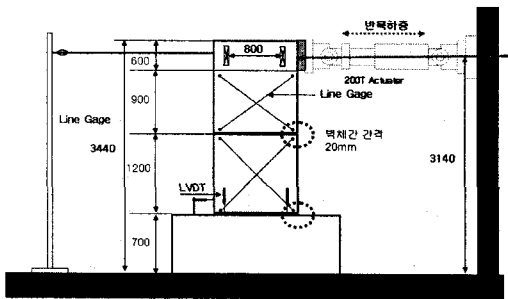


그림 7. 일자형 실험체 설치

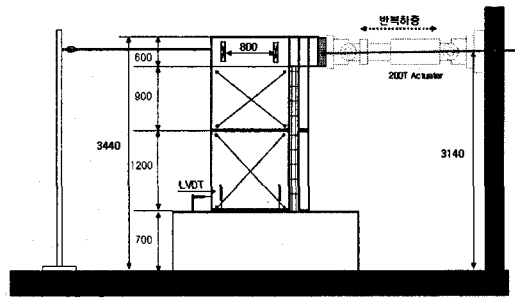


그림 8. T자형 실험체 설치

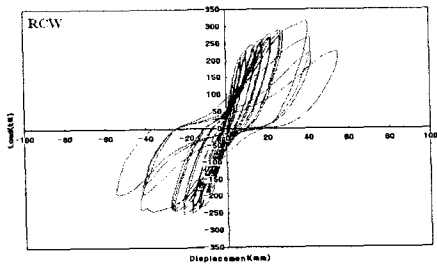
6. 실험결과

6.1 하중-변위 이력 곡선

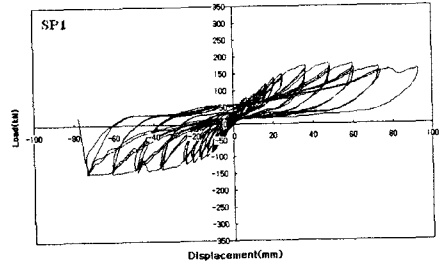
SP Series의 경우 일체형인 RCW의 경우보다 초기 강성은 작으나 우수한 연성적인 거동을 나타내었다.(그림9. (a),(b),(c),(d)) 상·하부 벽체 조립과정에서 C형 철물에 나 있는 슬릿의 시공오차로 인해 shear slip이 발생하였으며, 이러한 오차와 수평접합부에 설치된 shear key의 영향으로 하중-변위 이력곡선이 부분적으로 톱니형으로 나타났다. SP1의 경우 주근의 파괴, SP2의 경우는 주

근 나사산의 파괴, SP3의 경우는 접합부 용접파괴로 인해 실험을 종료하였다.(그림10.참조)

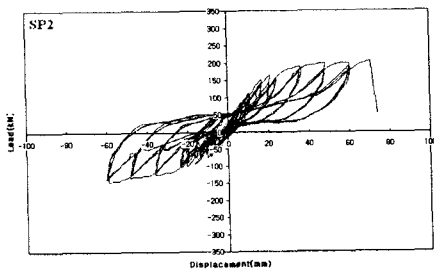
SPT Series의 경우 일반적인 RC T형 벽체의 거동과 비슷한 형태를 나타내었으며, SP Series와 마찬가지로 우수한 연성능력을 보여주었다. X자형 대각선 철근의 영향으로 두 가지 경우 모두 정 가력시보다 부가력시(web부분 인장) 그 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.



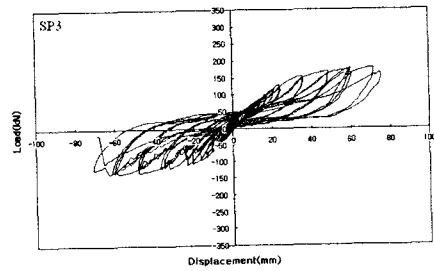
(a) RCW 하중-변위 이력곡선



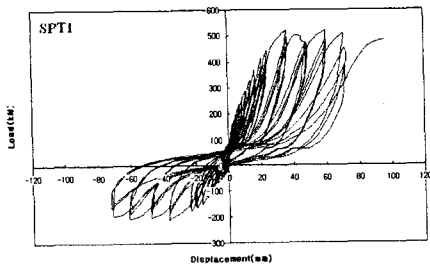
(b) SP1 하중-변위 이력곡선



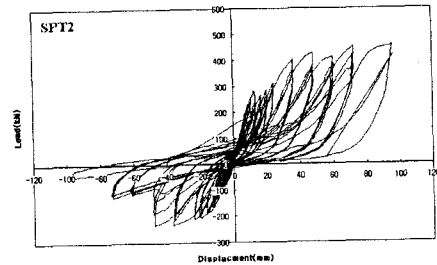
(c) SP2 하중-변위 이력곡선



(d) SP3 하중-변위 이력곡선



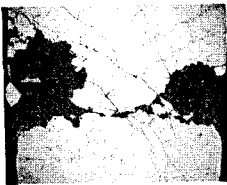
(e) SPT1 하중-변위 이력곡선



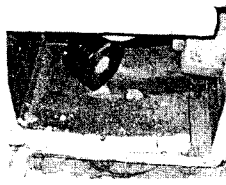
(f) SPT2 하중-변위 이력곡선

그림 9. 하중-변위 이력곡선

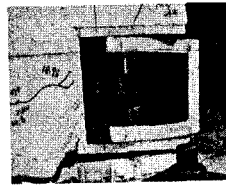
6.2 실험체별 최종 파괴 형상



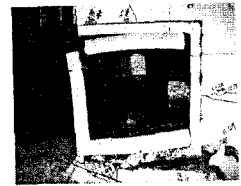
(a) RCW



(b) SP1



(c) SP2



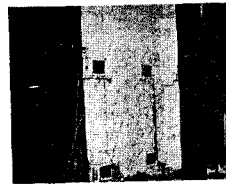
(d) SP3



(e) SPT1



(f) SPT1



(g) SPT2



(h) SPT2

그림 10. 실험체별 최종 파괴 형상

6.3 초기강성 및 영구변형

SP Series의 경우 기준 실험체인 RCW의 경우보다 월등히 낮은 값은 나타내었으며 SP1 실험체보다 대각선 철근이 배근된 SP2, SP3실험체가 초기강성이 약간은 더 높은 것으로 나타났다. 하지만 SP2, SP3실험체는 거의 같은 값을 가진 것으로 나타나 상부와 하부의 대각선 철근 유무가 벽체 강성에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있다. SP Series 실험체의 경우 하부 벽체의 거동이 벽체 전체의 거동을 지배하고 있고, 상부 벽체의 경우는 벽체 전체 거동에 크게 이바지 하고 있지 않기 때문이다.

SPT Series의 경우도 초기강성만을 비교했을 때 대각선 철근의 유무보다는 flange-web 접합부의 성능에 따라 달라진다고 할 수 있다. 현장 타설한 접합부의 파괴가 빠를수록 실험체 강성은 떨어지게 된다.

표 3. 초기강성 비교

실험체명		실험결과		
		초기항복하중(kN)	층간 변위각(%)	초기강성(kN/mm)
RCW	+	209	0.29	30.48
	-	-233.2	0.58	16.86
SP1	+	100.7	0.56	7.43
	-	-84.3	0.44	7.95
SP2	+	150.6	0.71	8.87
	-	-75.2	0.42	7.39
SP3	+	96.4	0.68	5.92
	-	-49.1	0.28	7.39
SPT1	+	261.2	0.36	29.99
	-	-124.6	0.56	9.27
SPT2	+	230.9	0.45	21.60
	-	-115.1	0.36	13.30

6.4 변형능력 및 연성능력

최대변위점은 하중이 최대하중의 80% 이하로 감소되는 점으로 정의하였으며, 항복점은 초기항복점을 기준으로 하였다. 그러나 모든 실험체가 최대하중의 80%까지 하중의 감소가 없었기 때문에 하중-변위 곡선에서 나타나는 최대변위점으로 수정, 산정하였다. SP Series 실험체의 경우 RCW보다 약3.5%정도 큰 연성도 값을 나타냈다. 하지만 한준희 모델(WB)과 비교했을 때에는 약 43%정도 증가된 연성도 값을 가진다. SPT Series의 경우 매우 우수한 연성능력을 가지고 있으며, 대각선 철근이 배근되지 않은 SPT1이 SPT2보다 좋은 연성도를 나타냈다.

표 4. 최대 층간 변위각 및 연성도

실험체명	파괴전	파괴전	연성도 (δ_{max}/δ_y)
	최대변위(δ_{max})	층간 변위각($\delta y/h$)	
RCW	39.62	7.01	5.2
SP1	93.11	16.6	5.6
SP2	73.77	17	4.3
SP3	75.01	16.4	5.8
SPT1	96.43	8.7	11.1
SPT2	96.27	10.7	9.0
한준희모델	80.76	8.7	3.6

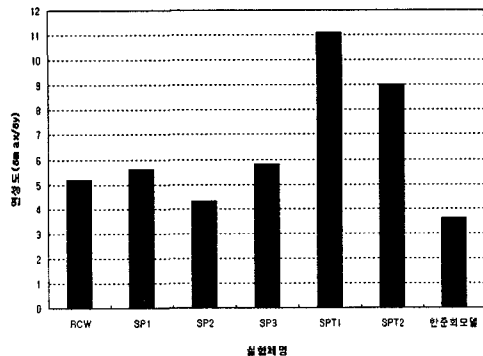


그림 11. 실험체별 연성도 비교

6.5 Envelop Curve 비교

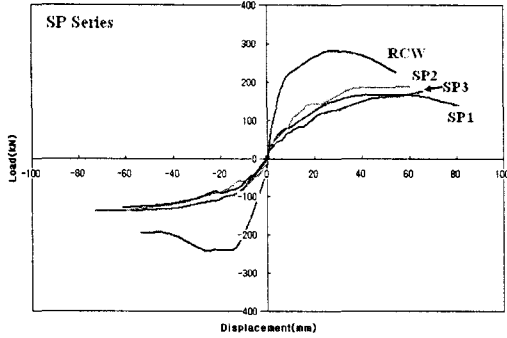


그림 12. SP Series Envelop Curve

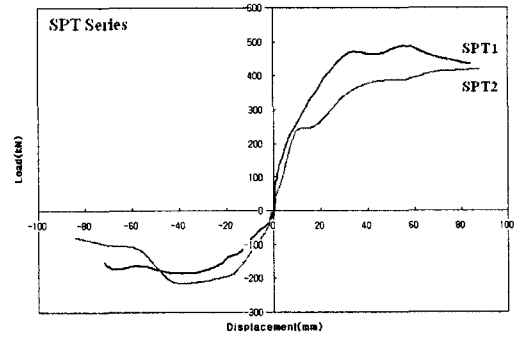


그림 13. SPT Series Envelop Curve

SP Series 실험체들의 하중-변위 곡선은 그림 12와 같다. 일체타설형 RCW 실험체와 비교했을 때 초기강성은 떨어지나 연성도는 비슷한 경향을 보인다.

SP1, SP2, SP3 실험체 모두 강성이나 연성능력에 대해 비슷한 경향을 보여주고 있으며 에너지 소산도 비슷한 경향을 가진다. 하지만 접합부 슬릿의 오차와 전단키 부분의 실험체 제작 오차로 인해 매끄러운 곡선이 아니라 톱니형 곡선을 형성하게 되었다. 하중이 계속 증가하는 시점에서 접합부의 파괴가 발생하여 negative stiffness 영역이 형성되지 않았다.

SPT Series의 경우 동일한 층간변위(4%)에서 파괴가 일어났으며, curve형상도 비슷한 경향을 보였다.(그림 13) 초기 강성과 연성도 면에서 SPT1이 우수하였고 최종파괴시 에너지 소산량을 비교했을 때는 SPT2가 우수한 면을 보였다. 초기 강성은 SPT1이 SPT2보다 다소 크게 나타났으나 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 하지만 에너지 소산능력과 연성도를 비교했을 때는 일반 RC로 만들어진 T형 벽체보다 우수한 경향을 나타내었다.

6.6 목표 변위별 에너지 소산능력 비교

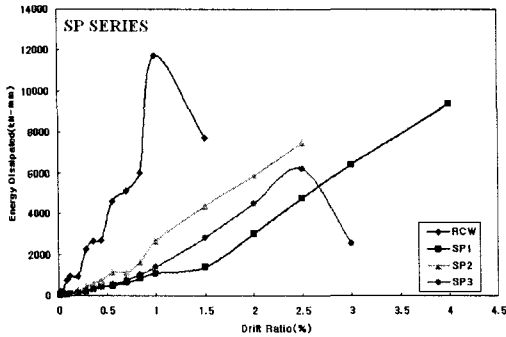


그림 14. SP Series 목표 변위별 에너지 소산량

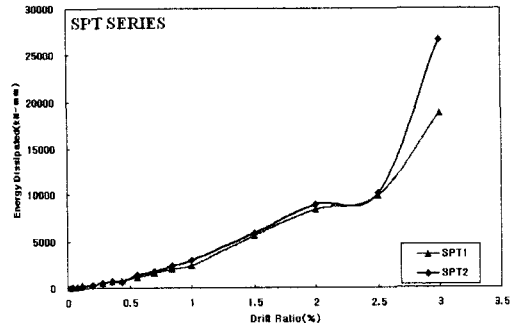


그림 15. SPT Series 목표 변위별 에너지 소산량

SP Series 실험체의 경우 RCW 실험체를 기준으로 했을 때 총에너지 소산량은 층간변위 1.5%(36mm)에서 RCW : SP1 : SP2 : SP3 = 1 : 0.18 : 0.57 : 0.36의 비율을 보였다. SP 실험체만을 비교했을 때에는 SP2 실험체를 기준으로 하면 SP1 : SP2 : SP3 = 0.32 : 1 : 0.65의 비율을 보였다. 이러한 결과는 상·하부 벽체의 강성비에 기인한 것으로 판단된다. 즉 SP1과 SP3의 경우 상·하부 벽체의 강성비가 동일하지만 SP2의 경우 하부벽체에만 대각선 철근이 배근되어 있어 상대적으로 상부벽체의 거동이 다른 실험체와는 다른 양상을 보여 에너지 소산능력이 커진 것으로 판단된다. T형 실험체의 경우는 층간변위 3%(72mm)에서의 에너지 소산량을 비교해보면 SPT1 : SPT2 = 0.71 : 1의 비율을 보였다.

7. 결 론

(1) 일자형 실험체의 경우 RC 벽체보다 초기 강성은 작으나 우수한 연성능력과 에너지 소산능력을 보였다. 일자형 실험체의 경우 접합부 파괴로 인해 강도가 작게 나왔고, T형 실험체의 경우 flange-web 접합부의 조기파괴가 발생하였으나 시스템의 전단에 대한 저항성능은 크게 저하되지 않았으며, 특히 일자형 실험체의 경우 벽체의 균열을 최소화하며 접합부의 파괴를 유도하였다.

(2) 일자형 실험체의 경우 대각선 철근 배근 유무에 따라 강도의 변화가 그리 크지 않다.(SP1 : 178.164kN, SP2 : 203.35kN, SP3 : 174.735kN) 하지만 SP1과 SP3가 비슷한 강도를 나타내고 SP2와는 약 14%정도 낮은 값을 보이는데 이것은 상·하부 벽체의 강성의 차이에서 오는 것으로 판단된다. 즉 하부 벽체에만 대각선 철근을 배근했을 때 전단력에 대한 저항성이 뛰어나다고 할 수 있다. T자형 실험체의 경우 강도는 SPT1의 경우(520.87kN)가 SPT2의 경우(459.62kN)보다 약13% 높은 값을 나타냈다. 하지만 대각선 철근에 의해 힘의 전달이 원활해져 web부분의 대각선 균열 시기를 좀더 늦추는 결과를 가져왔다. 따라서 T형 벽체의 경우 대각선 전단 철근의 영향이 크다고 할 수 있다.

(3) 각각의 에너지 소산능력을 비교했을 때 일자형 실험체의 경우 동일 변위(층간변위1.5%, 36mm)에서의 에너지 소산량 비가 SP1 : SP2 : SP3 = 0.32 : 1 : 0.65으로 나타났다. 이 역시 상·하부 벽체 강성비에 기인한 것으로 판단되며, 하부벽체에만 대각선 철근이 배근된 SP2가 강도나 에너지 소산면에서는 타 실험체보다 우수하다고 할 수 있겠다. T형 실험체의 경우는 층간변위 3%(72mm)에서의 에너지 소산량을 비교해보면 SPT1 : SPT2 = 0.71 : 1의 비율을 보였다.

(4) 본 접합부는 상·하부 벽체를 연결시키는 데 있어서 벽체 내 주철근을 그대로 사용한다는 점에서 기존의 한준희 모델과는 차이가 있고, 보조 접합철물을 이용함으로써 횡력에 대한 저항을 하는 데 효과적일 것으로 생각된다. 하지만 횡력이 커질수록 접합 철물의 두께가 두꺼워져야 하는 문제점이 발생하게 된다. 그로 인해 추가로 접합하는 보조 철물의 두께가 두꺼워져야 하므로 현장 시공시 어려움이 따를 수도 있겠다. 그러나 내진설계가 요구되는 현 추세를 볼 때, 기타 다른 접합방법이나, 특히 일반적으로 쓰이는 습식접합의 경우보다는 구조적으로 훨씬 유용한 접합부가 될 수 있으며, 시공속도 향상을 통한 공기단축으로 재료비를 보완할 수 있는 방법을 모색할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설 핵심 기술 연구 개발사업(03산학연 A07-06) 지원과, 우림건설(주), 공간, ITM, GS건설, 건원, 한성PC, 동서PCC의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Englekirk, R, E. "Seismic Design of Reinforced and Precast Concrete Buildings", John Wiley and Sons, 2003, pp.348~402.
2. PCI Design handbook, 4th Edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 1992
3. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(AC318-02)", American Concrete Institute, 2002
4. 한준희(2005), "PC벽체의 건식접합부에 관한 실험연구" 석사학위 논문, 서울대학교 대학원 건축학과