

보강상세에 따른 프리캐스트 HPFRCC 커플링 보의 내진성능

Effect of Reinforcement Details on the Seismic Performance of Precast HPFRCC Coupling Beams

김 선 우* 윤 현 도** 박 완 신*** 전 에스더****
Kim, Sun Woo Yun, Hyun Do Park, Wan Shin Jeon, Esther

ABSTRACT

In order to effectively resist seismic loads, coupling beams must be sufficiently stiff, strong and possess a stable load-deflection hysteretic response. This paper reports experimental data on the seismic performance of precast HPFRCC coupling beams with variable details. Precast HPFRCC coupling beam was tested to evaluate their failure modes, shear behavior, micro crack pattern and energy dissipation. Based on the experimental results, precast coupling beam with diagonal and rhombic details offer greater performance and ductility than coupling beam with normal detail.

1. 서 론

최근 내진규정¹⁾이 크게 강화되고 건축물이 고층화됨에 따라 이에 필요한 횡하중 저항요소는 건축물의 안전성, 기능성 및 경제성을 지배하는 요인이 된다. 이러한 횡하중 저항요소로 전단벽이 널리 사용되고 있으며, 병렬전단벽은 구조적으로 횡하중에 대한 강성 증대뿐만 아니라 각종 설비 및 운송을 위한 공간구획요소로 활용되며, 엘리베이터와 같은 운송설비의 설치에 따라 각종별로 일정 크기의 개구부가 설치된다. 이 때 개구부와 개구부 사이의 보, 즉 커플링 보(Coupling beams)의 강성에 따라 독립 또는 병렬전단벽으로 횡하중에 대하여 상이한 거동²⁾을 하며 이러한 병렬전단벽이 우수한 내진성능을 발휘하기 위해서는 전단벽의 하부에서 항복기구가 형성되기 전에 커플링 보에서 소성현상이 발생하여야 한다. 그러나 기존의 철근콘크리트 커플링 보는 콘크리트의 취성적 성질을 개선하기 위한 소요 연성 확보를 위해 배근상세가 매우 복잡하여 배근 및 거푸집 공사에 따른 공기 증대와 같은 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존연구 결과³⁾에 따라 연성 및 균열분산능력이 우수한 하이브리드 섬유(PE+SC)를 사용한 고인성 시멘트 복합체(High performance fiber reinforced cement composites, 이후 HPFRCCs라 함) 및 이에 따른 다양한 보강상세를 커플링 보에 적용하여 철근콘크리트 커플링 보 부재의 연성 및 내진성능향상 및 프리캐스트화에 의해 시공성을 증진시킴으로써 커플링 보의 구조성능을 확보하면서 배근상세를 단순화하고자 하였다. 또한 이러한 보강상세에 따른 프리캐스트 HPFRCC 커플링 보의 파괴양상 및 내진성능을 실험적으로 규명함으로써 HPFRCC를 사용한 프리캐스트 커플링 보로 연결된 병렬전단벽의 내진성능 평가 및 설계기법에 관한 기초를 마련하고자 한다.

2. 실 험

2.1 시험체 계획

본 연구에서는 배근상세에 따른 HPFRCC 프리캐스트 커플링 보의 균열 및 파괴양상, 거동특성을 실험적으로 규명하기 위하여 그림 1에 나타난 바와 같이 일반배근(Normal), 대각보강(Diagonal detail), 마름모보강상세(Rhombic detail)를 각각 적용한 커플링 보를 철근콘크리트 벽체에 매립하여 Full scale로 시험체를 제작하였으며 표 1에 시험체 일람을 나타내었다.

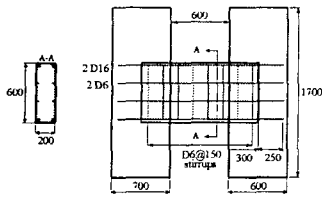
*정회원, 충남대 대학원 박사과정

**정회원, 충남대 건축공학과 부교수, 공학박사

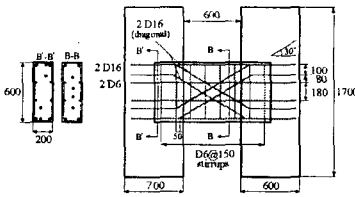
***정회원, 미국 Univ. of Cincinnati 토목공학과 Post Doc, 공학박사

****정회원, 충남대 대학원 석사과정

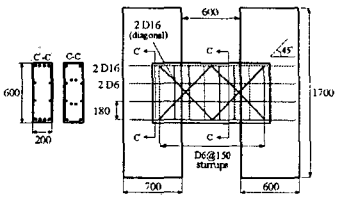
본 논문은 한국과학재단(과제번호 R01-2005-000-10546-0, F01-2005-000-10203-0)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이며 이에 감사드립니다.



(a) PCB-N 시험체



(b) PCB-D 시험체



(b) PCB-R 시험체

그림 1 시험체의 배근 및 상세(Unit : mm)

표 1 시험체 일람표

시험체명	B×D (mm)	축하중 (kN)	HPFRCCs 압축강도 f_{ck} (N/mm ²)	ρ_v (%)	ρ_h (%)
PCB-N*	200×600	141.22	60	0.77	0.21
PCB-D				1.43	
PCB-R					

* PCB-N : Precast Coupling Beam - (N: normal, D: diagonal, R: rhombic)

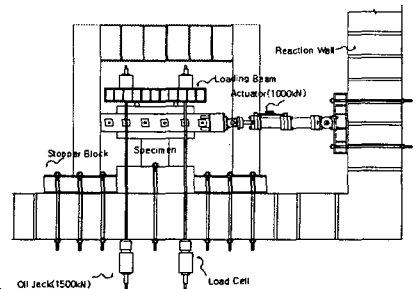


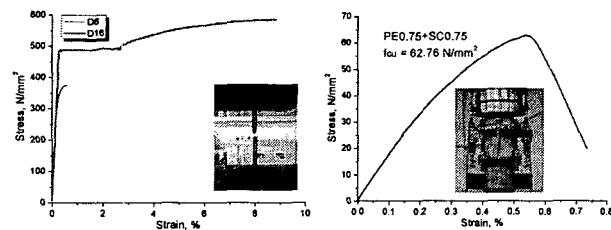
그림 2 시험체 설치상황

2.2 실험방법

시험체의 설치에 그림 2에 나타난 바와 같이 기초부가 완전 고정 상태가 되도록 강봉을 사용하여 반력바닥에 긴결하였으며, 횡방향 하중이 가력되는 동안 면의 좌굴이 발생하지 않도록 횡하중 가력선상에 좌굴 방지용 보 및 볼지그(Guide beam & ball jig)를 추가적으로 설치하였다. 횡하중은 반력력에 설치된 액츄에이터(Actuator)를 이용하여 부재각별로 각각 2회씩 반복 가력하였으며, 가력에 따른 시험체의 회전을 방지하기 위하여 반력바닥 하부에 설치된 오일잭(Oil jack)을 이용하여 $0.02A_g f_{cu}$ 의 축하중을 실험 종료시까지 일정하게 유지하였다.

2.3 사용재료

본 연구에서는 국부적인 균열 방지 및 반복하중 하에서 강성 또는 내력저하를 피하기 위하여 프리캐스트 커플링 보에 HPFRCCs를 적용하였으며 사용된 섬유에 대한 재료시험 결과는 그림 3 및 표 2, 3과 같다.



(a) 철근

(b) HPFRCCs

그림 3 재료의 응력-변형률 관계 곡선

표 2 철근의 기계적 특성

철근 종류	항복강도 f_y (N/mm ²)	항복변형률 ϵ_y	인장강도 f_u (N/mm ²)	포아송비
D6	291.19	0.0019	375.01	0.28
D16	474.96	0.0024	568.59	0.29

표 3 HPFRCCs의 강도 특성

	28일 압축강도 f_{cu} (N/mm ²)	최대변형률 ϵ_{cn} (%)
HPFRCCs	62.76	0.5405

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴양상

시험체의 최종파괴양상은 그림 4에 나타난 바와 같다. 일반 보강상세를 갖는 PCB-N 시험체에서는 부재각 0.8%에서 커플링 보의 중앙부에 초기 횡균열이 나타나기 시작하였으며, 부재각이 증가함에 따라 중앙부에서 양 단부로 수많은 미세균열이 발생되었다. 부재각 1.2%에 이르러 전단방향의 미세균열이 커플링 보의 단부부근에서 발생되기 시작하였으며, 2.2%에 이르러 폭 3mm의 균열이 발생되었다. 부재각이 증가함에 따라 기 발생된 균열폭이 점차 증가하여 내력이 저하되면서 그림 4(a)와 같이 최종파괴되었다. 대각보강근으로 보강된 PCB-D 시험체에서는 부재각 0.2%에서 커플링 보 하부에 초기

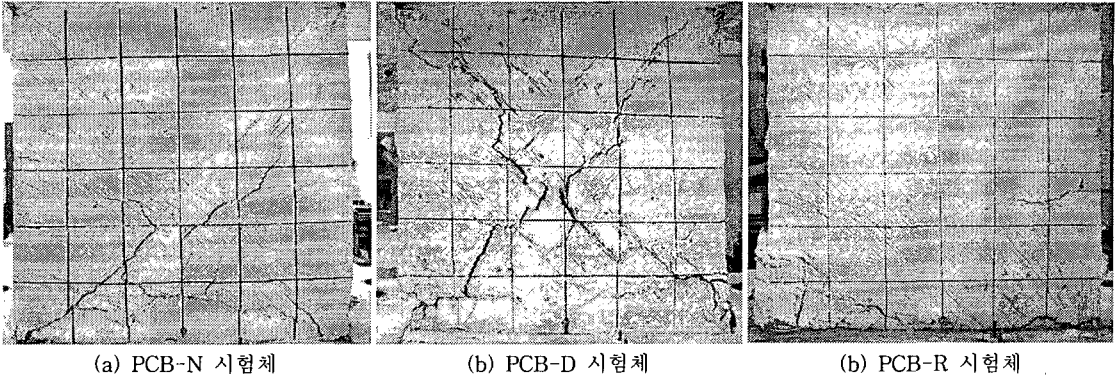


그림 4 최종파괴상황

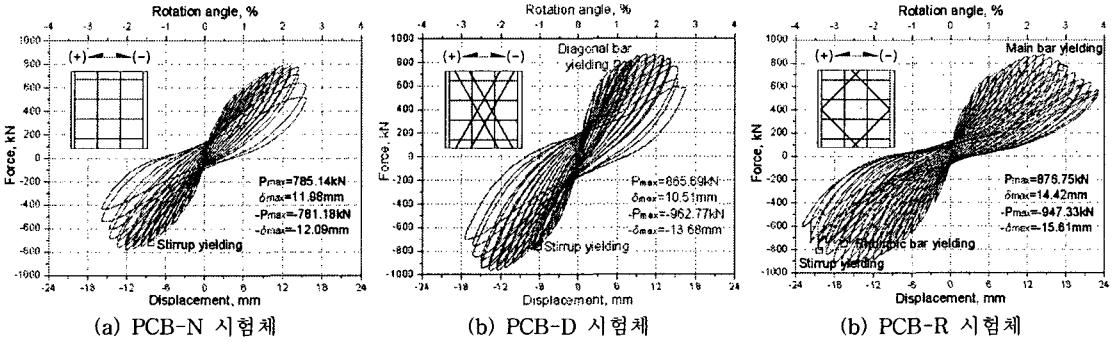
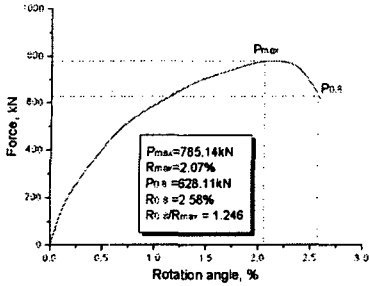


그림 5 하중-변위(부재각) 관계 곡선

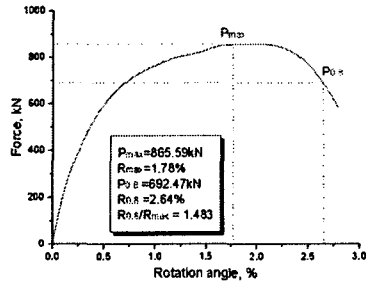
균열이 발생하였으며, 부재각 0.8%에 이르러 대각보강근이 배근된 커플링 보의 전단방향으로 미세한 균열이 급속히 진전되기 시작하였다. 부재각 1.8%에서 커플링 보의 양단 하부에 폭 2mm의 균열이 발생되어 점차 균열폭이 증가하였으며, 부재각 2%에서 약 2.2mm에 이르는 경사균열이 발생되었다. 부재각이 증가함에 따라 더 이상 미세균열은 발생하지 않았으며, 기 발생된 경사균열의 균열폭 및 하부의 휨균열폭이 점차 증가하면서 내력이 저하되어 그림4(b)와 같이 최종파괴되었다. 마름모 보강근으로 보강된 PCB-R 시험체는 부재각 0.4%에서 커플링 보의 중앙부에서 초기 휨균열이 발생되기 시작하였으며, 부재각 0.8%에 커플링 보 상부에서 경사균열이 발생되었다. 부재각 1.2%에 이르러 중앙부에서 시작된 휨균열이 점차 분산되어 중앙 하부에 수많은 미세균열이 발생하기 시작하였으며, 부재각 2.4% 이후부터는 커플링 보 전체에 수많은 경사방향의 미세균열이 지속적으로 발생됨과 동시에, 커플링 보의 양단부에 약 3mm의 휨균열이 발생하여 균열폭이 증가하기 시작하였다. 부재각 3.2% 이후부터는 더 이상의 미세균열은 발생하지 않았으며, 양단부의 휨균열폭이 점차 증가하면서 내력저하와 동시에 그림 4(c)와 같이 최종파괴되었다.

3.2 하중-변위 관계

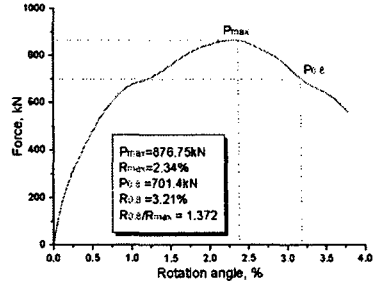
그림 5는 PCB-N, PCB-D 및 PCB-R 시험체의 하중-변위(부재각) 관계 곡선을 나타낸 그림이다. 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 PCB-N 시험체의 경우 최대하중이 785.14kN(R=2.07%)으로 나타났으며 이후 최대내력의 80%인 628.11kN(R=2.58%)까지 1.246의 연성비를 나타내었다. 또한, 그림 5(b) 및 (c)에서 나타난 바와 같이 PCB-D 및 PCB-R 시험체의 최대하중은 각각 865.59kN(R=1.78%) 및 876.75kN(2.34%)으로 나타나 일반보강상세를 갖는 PCB-N 시험체에 비해 각각 10.25 % 및 11.67%의 내력이 증가되었으며(그림 7), 연성비는 각각 1.483 및 1.362를 나타내어 PCB-N 시험체에 비해 보강에 따른 연성 증진효과가 19.02% 및 9.31% 있는 것으로 나타났다(그림 6). 그림 8은 부재각 증가에 따른 각 시험체의 강성저하율(k/k_i , %)을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 초기에는 큰 차이를 나타내고 있지는 않으나, PCB-D, PCB-R, PCB-N 시험체 순서로 강성저하율이 큰 것으로 나타났다.



(a) PCB-N 시험체



(b) PCB-D 시험체



(b) PCB-R 시험체

그림 6 보강상세에 따른 연성비 비교

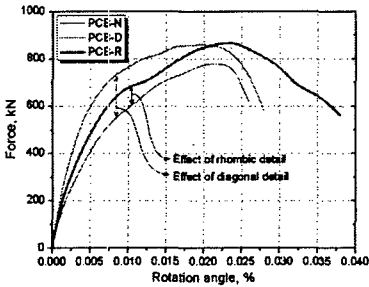


그림 7 보강상세에 따른 강도비교

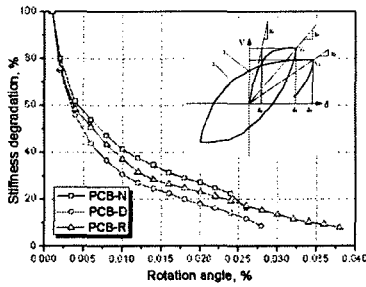


그림 8 강성저하특성

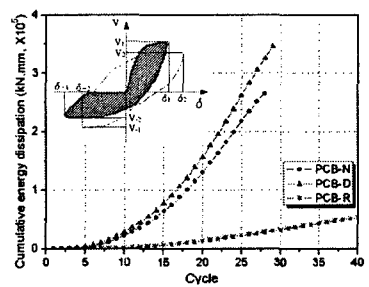


그림 9 누적에너지 소산능력

3.3 에너지 소산능력

그림 9에 사이클별 누적에너지소산능력을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 정가력시 첫 번째 사이클에서 PCB-N, PCB-D 및 PCB-R 시험체의 에너지 소산면적은 각각 174.19, 240.00 및 19.74kN·mm로 나타났고 동일사이클(n=18, R=1.6%)에서 에너지 소산면적은 100,882.06, 121,724.90 및 10764.98 kN·mm로 나타나 PCB-R 시험체가 다른 시험체에 비해 약 10%의 누적에너지소산능력을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

- 1) HPRCC 커플링 보에서 보강상세에 관계없이 최대하중에 이르기까지 수많은 미세균열 발생 및 진전이 나타났으며, 양단부의 균열폭 증가로 최종파괴된 것으로 보아 콘크리트 내 하이브리드된 보강 섬유가 가교작용에 의한 마이크로 및 매크로균열을 제어한 것으로 사료된다.
- 2) 대각 또는 마름모 보강근을 갖는 PCB-D와 PCB-R 시험체는 PCB-N 시험체에 비해 최대내력에서 각각 10.25% 및 11.67%, 연성비에서 각각 19.02% 및 9.31%의 증가를 보여 대각 및 마름모 보강에 따른 내력 및 연성 증진효과가 있는 것으로 판단된다.
- 3) 마름모 보강근을 갖는 PCB-R 시험체는 최대내력 및 연성증진에 효과가 있는 것으로 나타났으나, 다른 시험체에 비해 약 1/10 정도의 에너지소산능력을 가지는 것으로 나타나 내진성능 면에서 보강상세에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 하이브리드 섬유의 사용 및 커플링 보의 프리캐스트화로 인해 연성, 균열분산능력 및 시공성이 향상되었으며, 특히 균열발생 및 파괴시 손상을 유도(Damage fuse)하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건축구조설계기준(2005), 대한건축학회
2. Bahram M. Shahrooz, Partick J. Fortney(2005), "The next generation of coupling beams", Univ. of Cincinnati
3. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 김선우(2004), "하이브리드 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 반복 인장거동", 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, v.24 n.2, pp.119-122