

대각보강근을 갖는 고인성 시멘트 복합체 커플링 보의 손상 평가

Damage Evaluation for Precast HPFRCC Coupling Beams with Diagonal Reinforcement

김선우*
Kim, Sun-Woo

전에스터*
Jeon, Esther

박완신**
Park, Wan-Shin

윤현도***
Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

To restore an earthquake damaged community as quickly as possible, well-prepared reconstruction strategy is most essential. This paper reports experimental data on the seismic capacity of diagonal reinforced HPFRCC coupling beams with the Japanese Standard for Seismic Evaluation of Existing RC Buildings. Precast Based on the experimental results, HPFRCC specimen have more residual seismic capacity than RC specimen, but much study is necessary to improve the accuracy of the damage evaluation.

1. 서론

지진을 경험한 구조물은 그 안전성이 손상 정도에 따라 저하되며, 여진에 대한 안전성의 판정이나 보수·보강을 위해 구조물의 내진성능이 정확하게 평가되어야 한다. 이에 일본(JBDP)에서는 철근콘크리트 부재의 균열폭 및 에너지흡수능력에 관한 연구를 통해 지진피해도 평가를 위한 기준¹⁾을 제정하였다. 또한 내진규정²⁾이 강화됨에 따라 현재 콘크리트의 재료적 단점인 취성적 성질을 개선 및 보완하고 균열에 대한 저항능력을 개선하여 배근상세를 단순화하고자 하는 목적으로 국내·외에서 활발한 연구가 진행되고 있는 HPFRCC는 주요 내진부재에 폭넓은 미세균열(Multiple cracks) 확산 및 유사변형경화 특성을 부여함으로써 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있는 것으로 잘 알려져 있다.³⁾ 또한 HPFRCC를 적용한 부재는 균열제어능력 및 에너지흡수능력 등 내진성능이 콘크리트와 매우 상이하나, 이러한 HPFRCC 구조부재에 적용하기 위한 손상평가 기법이 마련되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대각보강 커플링 보에 HPFRCC를 적용하여 HPFRCC의 손상제어능력을 평가하고, 이를 사용한 구조부재의 손상수준 평가를 통해 HPFRCC를 적용한 구조부재의 손상평가에 관한 기초 자료를 마련하고자 한다.

2. 손상지표(Seismic damage indices)

기존 연구자들은 철근콘크리트 구조부재의 손상수준을 평가하기 위하여 다양한 지표를 제안하였으며 최근 EERI⁴⁾ 및 JBDP에서는 물리적 현상을 근거로 구조부재 및 시스템의 손상수준을 5단계로 분류하는 기준을 제안하였다. 본 연구에서는 각 단계별 손상수준과 HPFRCC 합성 커플링 보의 실험으로 나타난 거동 특성 및 손상지표의 상관관계를 분석하고자 한다.

지진 등 황하중으로부터 피해를 입은 부재의 내진성능 저하수준을 판단하기 위한 내진성능감소계수 η 는 다음 식(1)과 같이 정의된다.

* 정회원, 충남대 건축공학과 박사과정

** 정회원, 미국 Cincinnati 대학 토목공학과 연구원, 공학박사

*** 정회원, 충남대 건축공학과 부교수, 공학박사

$$\eta = E_r / E_t \quad (1)$$

여기서, E_r 은 부재에 남아있는 에너지소산면적이며, E_t 는 전체 에너지 소산면적이다.

또한, 손상지표(Damage index, D_{ew})는 사이클별 소산된 에너지와 탄성 에너지를 이용한 것으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$D_{ew} = \frac{1}{F_{\max} \delta_y} \sum E_i \left(\frac{K_i}{K_y} \right) \left(\frac{\delta_i}{\delta_y} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, K_i 및 K_y 는 i 사이클시 및 항복 할선강성이고, E_i 는 i 사이클시 소산에너지이다.

3. 실험

3.1 시험체 계획 및 제작

본 연구에서는 그림 1과 같이 콘크리트 및 HPFRCC를 사용한 대각보강 커플링 보를 제작하여 반복 하중 하에서 커플링 보의 손상과정을 평가하고자 하였다. 시험체 제작시 사용된 HPFRCC는 마이크로 섬유인 PE와 매크로 섬유인 SC를 각각 시멘트 체적비 0.75%씩 총 1.50%의 섬유로 보강되었다. 또한 본 연구에서는 벽체에 매립되는 커플링 보를 프리캐스트화하여 HPFRCC의 낮은 시공성을 보완하고자 하였다.

3.2 실험방법

시험체에 가력되는 횡하중은 반력벽에 설치된 1,000kN 용량의 액추에이터(Actuator)를 이용하여 부재각별로 각각 2회씩 반복 가력하였으며, 가력에 따른 시험체의 회전을 방지하기 위하여 반력바닥 하부에 설치된 오일잭(Oil jack)을 이용하여 0.02 $A_g f_{cu}$ 의 축하중을 실험 종료시까지 일정하게 유지하였다.

3.3 사용재료

본 연구에서는 국부적인 균열 방지 및 반복하중 하에서 강성 또는 내력저하를 피하기 위하여 프리캐스트 커플링 보에 SC 및 PE 섬유를 하이브리드하여 적용하였으며, 사용된 보강섬유의 형상 및 물리적특성은 그림 3 및 표 2에 나타난 바와 같다. 또한 커플링 보에 사용된 철근의 기계적 특성, 콘크리트 및 HPFRCC의 강도특성을 표 3 및 4에 각각 나타내었다.

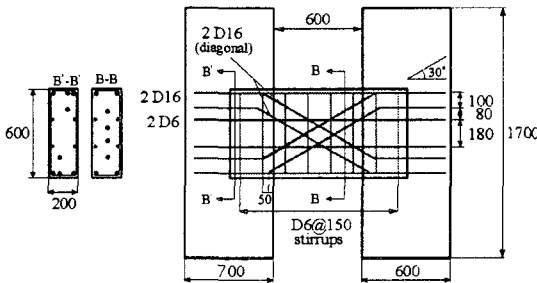


그림 1 시험체의 배근 및 상세(Unit : mm)

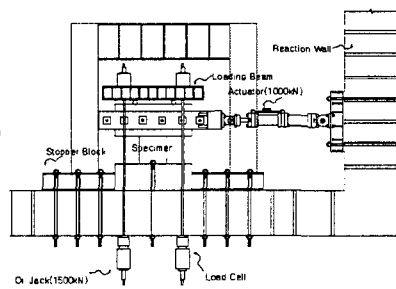
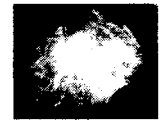
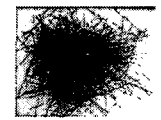


그림 2 시험체 설치상황



(a) PE



(b) Steel Cord

표 1 시험체 일람표

시험체명	B×D (mm)	f_{ck} (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	ρ_b (%)	ρ_s (%)
PCB-DC*	200×600	50	400	0.99	0.52
PCB-DH					

* PCB: Precast Coupling Beam

D: diagonal, C: concrete, H: HPFRCC

표 2 보강섬유의 기계적 특성

종류	비중 (kg/cm ³)	길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (N/mm ²)	탄성계수 (kN/mm ²)
PE	97	15	12	2,500	75
Steel cord	7,850	32	405	2,300	206

표 3 철근의 기계적 특성

철근 종류	항복강도 f_y (N/mm ²)	항복변형률 ϵ_s (%)	인장강도 f_t (N/mm ²)
D6	291.19	1.9	375.01
D16	474.96	2.4	568.59

표 4 콘크리트 및 HPFRCC의 강도 특성

	28일 압축강도 f_{cu} (N/mm ²)	최대변형률 ϵ_{cu} (%)
콘크리트	44.02	0.2239
HPFRCC	56.76	0.5405

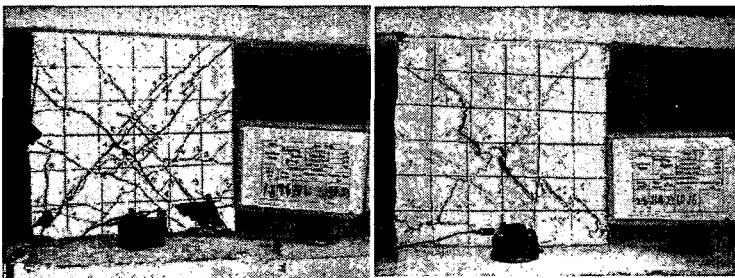
4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴양상

그림 4에 프리캐스트 커플링 보의 최종 파괴양상을 나타내었다. 콘크리트를 사용한 PCB-DC 시험체에서는 커플링 보의 하단 및 중앙부의 인장측 연단에 초기 휨균열이 나타나기 시작하였으며, 연단에서 보의 단면의 중앙부로 진전되며 휨균열은 전단균열로 발전되었다. 또한 기 발생된 균열폭이 점차 증가하면서 부재각 1.6%에 이르러 사인장 균열폭이 급격히 증가되며 대각보강근이 항복하고 휨압축부가 압괴되는 심각한 피해를 보이며 내력이 급격히 저하되는 취성적인 파괴특성을 나타내었다. 반면 HPRCC를 사용한 PCB-DH 시험체에서는 부재각 0.2%에서 커플링 보 하부에 초기균열이 발생하였으나, 부재각 0.8% 이전까지 초기균열은 더 이상 진전되지 않았으며, 대각선 방향으로 발생한 전단균열이 부재각 1.2%에 이를 때까지 폭넓게 확산되었으나 미세한 균열폭이 국부적으로 증가되어 매크로 균열로 발전되지는 않았다. 또한 부재각 2.6%에서 대각보강근 및 전단보강근이 정방향 및 부방향에서 각각 항복되었으나 이에 따른 내력저하 및 균열폭의 급격한 진전은 나타나지 않았다. 이후 부재각이 증가에 따른 미세균열은 더 이상 발생하지 않았으며, 기 발생된 경사균열의 균열폭 및 하부의 휨균열폭이 점차 증가하면서 내력이 저하되어 최종 파괴되었다. 또한 그림 5에 나타난 바와 같이 JBDP에서 제안하고 있는 각 단계별 구조부재의 손상수준을 분석한 결과, 동일한 손상단계시 HPRCC의 부재각이 상대적으로 크게 나타나 보강섬유의 균열폭 제어에 의한 내진성능이 우수한 것으로 판단되었다.

4.2 하중-변위 관계

그림 5는 커플링 보의 하중-변위(부재각) 관계 곡선에 시험체의 균열과 같은 외형적 손상정도를 근거로 평가한 손상단계를 나타낸 그림이다. PCB-DC 시험체의 경우 최대하중이 703.96kN(R=1.01%)으로 나타났으며 이후 최대내력의 80%인 563.17kN(R=1.20%)까지 1.188의 연성비를 나타내었다. PCB-DH 시험체의 최대하중은 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 865.59kN(R=1.78%)으로 나타나 콘크리트를 적용한 PCB-DC 시험체에 비해 22.96% 내력이 증가되었다. 또한 최대내력의 80%인 692.57kN(R=2.64%)까지 연성비 1.483를 나타내어 PCB-DC 시험체에 비해 24.83% 증가하였다. 이는 섬유 강화 콘크리트의 가교작용에 기인한 것으로 섬유 보강을 통한 연성 증진효과가 있는 것으로 판단되며, JBDP 및 EERI 손상수준 정의에 따라 최대내력에 이를 때까지 HPRCC 커플링 보의 손상정도 수준 내에 보수가 가능한 정도로 평가된다. 그림 7은 식 (1)에 의한 균열폭에 따른 시험체의 내진성능감소계수 η 를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 균열폭 1mm(Ⅲ단계) 이후 PCB-DH 시험체의 잔류에너지소산면적이 PCB-DC 시험체에 비해 높게 나타났으며, 이는 JBDP 및 EERI의 손상수준 정의를 HPRCC에 적용시 다소 과소평가하는 것으로 판단된다. 또한 식 (2)와 같이 에너지 및 비탄성 변형으로 평가되는 손상지표 D_{ew} 는 PCB-DC 시험체의 파괴시까지 대등한 값을 보이며, PCB-DH 시험체에서는 부재각 1.6% 이후 손상수준이 진전됨에 따라 손상지표는 급격한 증가를 보이고 있어 기존 제안된 손상지표 D_{ew} 는 피해를 입은 구조물의 물리적인 손상수준과 연관성이 높은 것으로 평가된다. 특히 D_{ew} 는 손상수준의 심각성이 증가됨에 따라 손상지표의 증가율이 현저히 증가되는 경향이 있어, 이러한 손상지표를 근거로 손상수준의 예측이 가능할 것으로 평가된다.



(a) PCB-DC (Rotation angle=1.6%) (b) PCB-DH (Rotation angle=2.8%)

그림 4 시험체의 파괴양상

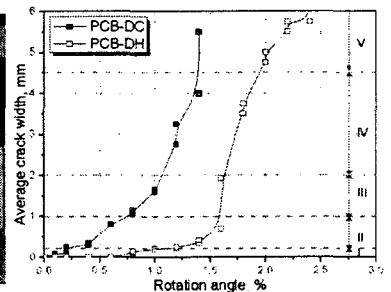
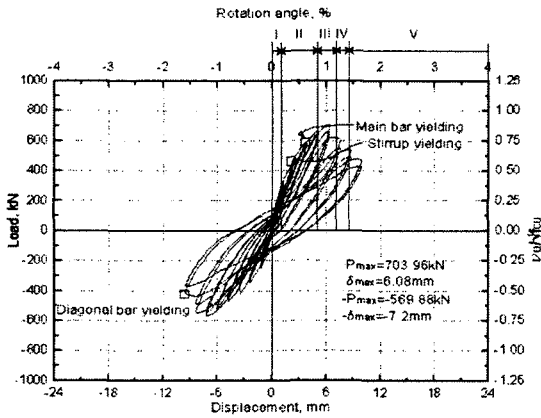
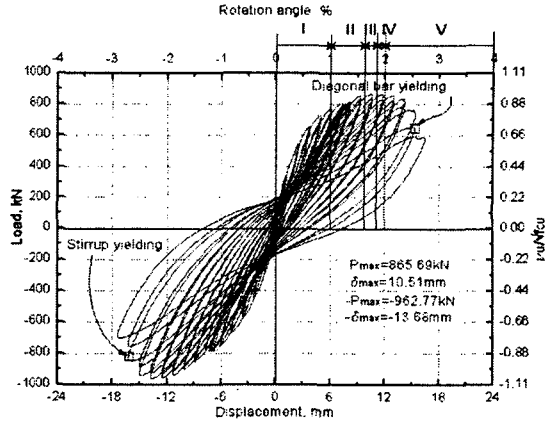


그림 5 균열폭 비교



(a) PCB-DC



(b) PCB-DH

그림 6 하중-변위(부재각) 관계 곡선

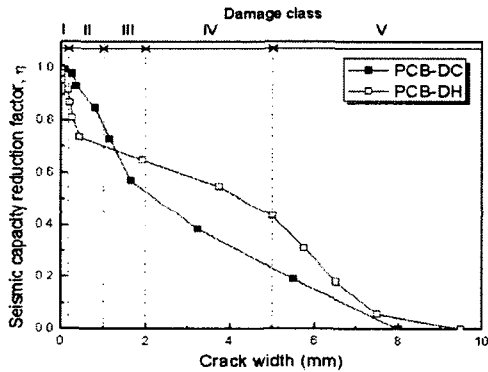


그림 7 내진성능감소계수 η

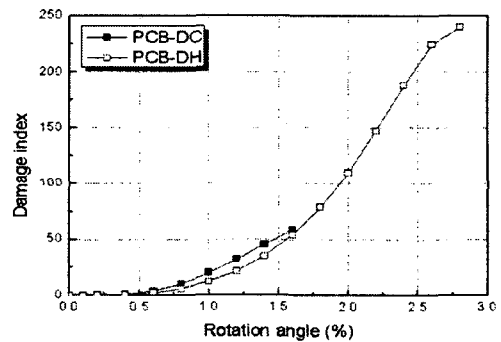


그림 8 손상지표

4. 결론

- 1) HPFRCC를 사용한 대각보강 커플링 보는 보통 콘크리트를 사용한 커플링 보에 비하여 손상제어 능력이 탁월한 것으로 나타났으며 따라서 급격한 파괴가 예상되거나 높은 에너지흡수능력이 요구되는 내진부재에의 적용 가능성이 높은 것으로 판단된다.
- 2) HPFRCC 부재의 손상수준 예측에 EERI 및 JBDP에서 제안하고 있는 철근콘크리트 구조부재 손상평가기준의 적용가능성이 있는 것으로 평가되었다. 그러나 HPFRCC 부재의 균열폭 및 이에 따른 손상 및 잔류에너지흡수능력을 정량적으로 평가하기 위해서는 더욱 다양한 부재의 잔류에너지 평가에 대한 연구 및 DB화가 요구된다.

감사의글

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

참고문헌

1. JBDPA/The Japan Building Disaster Prevention Association, "Guideline for Post-earthquake Damage Evaluation and Rehabilitation", 2001.
2. 대한건축학회, "건축구조설계기준", 2005.
3. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 김선우, "하이브리드 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 반복 인장 거동", 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, v.24 n.2, pp.119-122, 2004.
4. EERI, "Expected seismic performance of buildings," Publication SP-10, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 1994.