



대각철근을 갖는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체 연결보의 이력거동 평가

권현욱¹⁾ · 전용률¹⁾ · 이기학²⁾ · 신명수³⁾ · 한상환^{1)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 ²⁾세종대학교 건축공학과 ³⁾울산과학기술대학교 도시환경공학부

Cyclic Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composite Coupling Beam Having Diagonal Reinforcement

Hyun-Wook Kwon,¹⁾ Yong-Ryul Jeon,¹⁾ Ki-Hak Lee,²⁾ Myung-Su Shin,³⁾ and Sang-Whan Han^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

³⁾School of Urban and Environment Engineering, Unist, Ulsan 689-798, Korea

ABSTRACT Coupled shear walls can provide an efficient structural system to resist lateral force. However, the reinforcement detail for diagonally reinforced coupling beams required by ACI-318 often causes the difficulties in construction due to the reinforcement congestion and interference among reinforcement. This paper is to evaluate cyclic behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composite (HPFRCC) coupling beams having reduced transverse reinforcement around the beam perimeter. Experimental test was conducted using three specimens having a beam aspect ratio 2.0. Test results showed that HPFRCC coupling beams with half of transverse reinforcement required by ACI-318 provided similar energy dissipation capacities compared with the coupling beams having reinforcement satisfy the requirement of ACI-318.

Keywords : coupling beam, coupled shear walls system, diagonal reinforcement, high-performance fiber-reinforced cement composite, cyclic behavior

1. 서 론

1.1 연구배경

강도와 강성이 큰 구조벽체(structural walls)는 횡력저항 시스템(lateral force resisting system)으로 널리 사용되어 왔다. 독립된 구조벽체를 연결보(coupling beam)로 연결한 병렬전단벽시스템(coupled shear walls system)은 독립 벽체로 구성된 전단벽 시스템보다 높은 강도와 강성을 보유하기 때문에 더 효율적인 구조시스템이다. 병렬전단벽시스템에서는 지진 발생 시 연결보에 큰 전단변형이 발생하며, 연결보의 취성파괴를 피한다면 시스템에 입력된 대부분의 지진에너지를 연결보가 소산시킬 수 있다. 따라서 병렬전단벽시스템의 내진거동은 연결보의 에너지소산능력에 크게 의존한다고 할 수 있다.

1964년 Anchorage 지진으로 인한 Mount McKinley 건

물의 파괴양상은 일반 보 배근을 한 철근콘크리트 연결보의 단점인 미끄러짐 전단파괴(sliding shear failure)를 보여주며, 이후 연결보의 내진거동에 대한 연구가 활발해졌다. 대표적으로 Paulay and Binney가 제안한 대각철근을 배근한 연결보는 일반적인 보 배근을 한 연결보보다 향상된 내진거동 특성을 보유하고 있으며 큰 변형에서도 우수한 강도 및 강성을 유지하였고, 에너지 소산 능력도 우수한 것으로 입증되었다.^{1,2)} 이러한 연구를 바탕으로 ACI 318(2008) 21.9.7에서는 대각철근을 갖는 연결보에 대하여 두가지 횡구속 철근 상세(Fig. 1)를 제시하고 있다.³⁾

첫 번째 상세(Fig. 1(a))는 각각의 대각철근 요소가 종방향과 횡방향 철근으로 구성되고, 대각철근은 적어도 4개의 철근으로 배근되어야 한다. 이 상세는 복잡한 배근으로 인해 현장적용이 어려운 단점이 있다. 두 번째 상세(Fig. 1(b))는 대각철근에 횡방향 철근을 배근하는 대신 연결보 전체 둘레에 특수모멘트골조의 보-기둥 부재에서 요구하는 횡구속 철근을 적용하였다. 두 번째 상세는 첫 번째 상세보다 단순화 되었지만 과도한 횡구속 철근이 요구되어 현장 시공상 어려움이 있으며, Harries et al.은 전단요구수준이 $0.5 \sqrt{f_{ck}}$ MPa 이상인 경우 대각철근의 배근이 현실적으로 어렵다고 보고하였다.⁴⁾ 이러한 이유로

*Corresponding author E-mail : swan82@gmail.com

Received July 5, 2013, Revised September 26, 2013,

Accepted Accepted November 15, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

ACI 318(2011)에서 전단요구수준을 $10\sqrt{f_{ck}}$ psi ($0.83\sqrt{f_{ck}}$ MPa) 이하로 요구하고 있으며, 국내 콘크리트구조기준에서도 $5\sqrt{f_{ck}}/6$ MPa로 동일하게 규정하고 있다.^{5,6)}

연결보의 시공상 편의를 위하여 다양한 철근상세 연구가 진행되었고,^{1,7-9)} 콘크리트의 취성 파괴 성질을 개선하고자 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(high-performance fiber-reinforced cement composite, HPRC)를 적용한 연결보가 국내·외에서 개발되고 있다. 1990년대에 개발된 섬유보강 시멘트 복합체는 낮은 체적비($\leq 2\%$)의 섬유를 혼입하여도 인장변형경화 성질을 유지한다.¹⁰⁾ 이러한 인장변형경화 성질을 통해 인장시험에서 섬유보강 시멘트 복합체는 일반콘크리트의 균열강도보다 더 큰 강도를 발휘할 수 있고, 초기균열 이후에도 일반콘크리트와 달리 다수의 미세균열이 전 부재에 고르게 발생하여 최대변형률이 2~5%에 이르는 연성적인 파괴가 발생할 수 있다.

윤현도 등¹¹⁾은 형상비 1.0에 대해 섬유보강 시멘트 복합체를 적용하므로 단순화된 대각철근 상세를 갖는 연결보 실험을 수행하였다. Canbolat et al.¹²⁾은 섬유보강 시멘트 복합체를 형상비 1.0의 연결보에 적용하여 ACI 318(2011)의 첫 번째 횡구속 상세를 기준실험체로 하여 다른 철근상세를 갖는 연결보 실험 연구를 수행하였다.

1.2 연구의 목적 및 방법

이 연구에서는 ACI 318(2011)의 두 번째 횡구속 철근상세를 기초로 하여 HPRC를 적용한 단순화된 철근상세를 제안하고, 이를 프리캐스트 부재로 생산하여 시공성을 개선하였다. 일반적인 주거건물의 연결보 형상비는 2.4로 보고하고 있으며,¹³⁾ 이를 고려하여 연결보 실험체는 대각철근을 갖는 철근콘크리트 연결보와 기준 실험체의 횡구속 철근량을 감소시킨 HPRC 연결보 실험체를 실험적으로 비교하여 이력거동을 평가하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험체 계획

이 연구에서는 반복하중 하에서 연결보의 구조적 성능

을 평가하기 위하여 3개의 연결보 실험체를 제작하고 실험을 수행하였다. 실험의 주요변수는 섬유의 사용여부, 횡구속 철근량이다. 대각철근 상세는 ACI 318(2011)의 두 번째 대안 상세인 Fig. 1(b)를 기초로 하였다. 이 상세는 압축에 의한 대각철근의 좌굴을 막기 위한 대각철근 자체에 횡구속을 하는 방법을 보완하기 위하여 연결보 전체 단면에 수평 및 수직 횡구속 철근을 조밀하게 배근하는 방법이다.

기준 실험체 RC는 형상비가 2.0으로 ACI 318(2011)의 설계 및 철근상세 기준에 따라 제작한 실험체이다. FC-0.0은 RC 실험체의 횡구속 철근 대신 HPRC를 이용한 실험체로, 이 실험체의 실험 결과를 RC 실험체와 비교하여 HPRC가 연결보의 횡구속에 기여하는 정도를 평가하였다. FC-0.5는 RC 실험체의 횡구속 철근량을 1/2 감소시키고 HPRC로 보강한 실험체로, RC 실험체와 비교하여 HPRC 실험체의 횡구속 철근량 감소에 따른 구조적 거동 차이를 파악할 수 있다.

실험체 일람을 Table 1에 나타내었고, 실험체의 형상

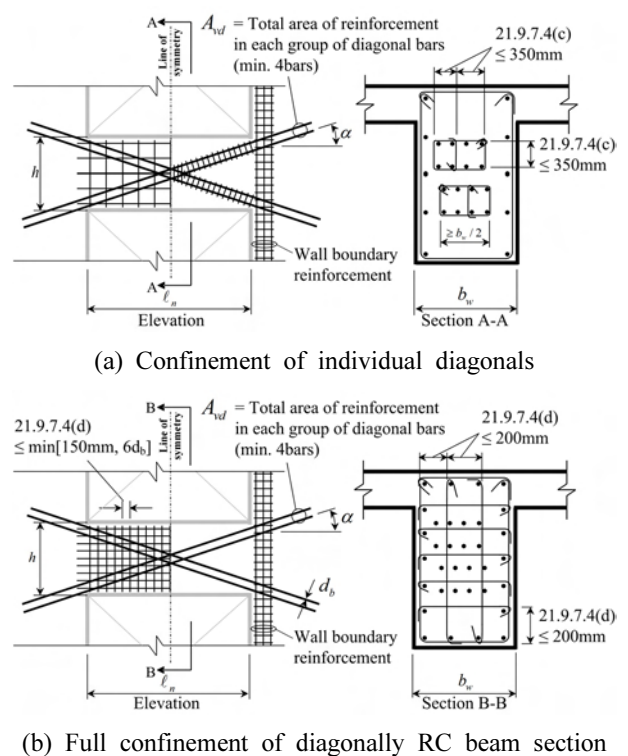
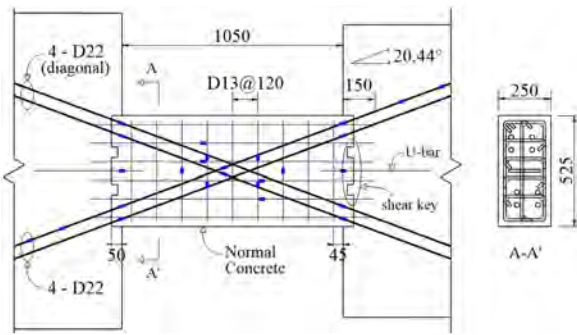


Fig. 1 Two confinement layout of diagonals in ACI 318 (2008)

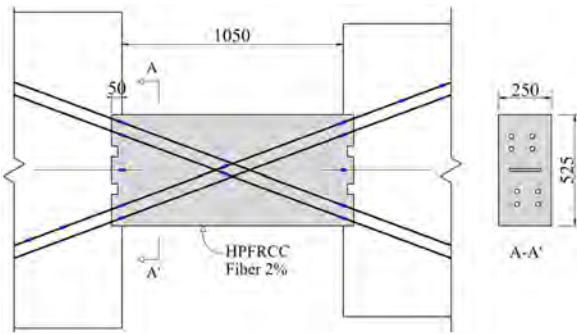
Table 1 Summary of test specimens

| Specimen | Width (mm) | Height (mm) | Span (mm) | Span-to-height ratio (L_n/h) | Angle α (degree) | Diagonal reinforcement | | Longitudinal reinforcement | | Transverse reinforcement | |
|----------|------------|-------------|-----------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|----------------------------|-------------|--------------------------|---------|
| | | | | | | Bar size no. | No. of bars | Bar size no. | No. of bars | Bar size no. | Spacing |
| RC | 250 | 525 | 1050 | 2.0 | 20.4 | 22 | 8 | 13 | 14 | 13 | 120 |
| FC-0.0 | | | | | | | | × | × | × | × |
| FC-0.5 | | | | | | | | 13 | 14 | 13 | 250 |

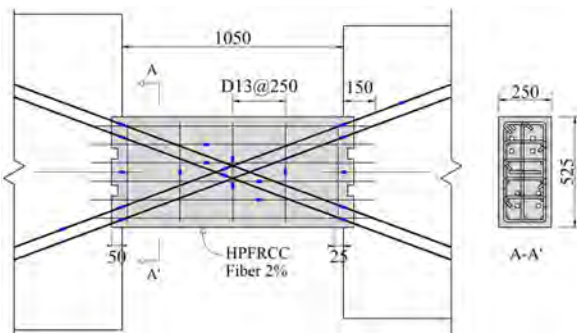
Note) × : denotes no reinforcement



(a) RC



(b) FC-0.0



(c) FC-0.5 ■ strain gauge

Fig. 2 Reinforcement detail of test specimens (unit: mm)

및 배근 상세는 Fig. 2와 같다. 각 실험체의 대각철근량은 예상되는 최대평균전단응력이 $0.5\sqrt{f_{ck}}$ MPa 정도로 결정하였다. 그리고 HPFRCC의 현장타설은 일반콘크리트에 비해 품질관리가 어렵기 때문에 모든 실험체는 프리캐스트로 제작하였다. 양단 끝에 전단에 의한 미끄러짐을 막기 위해 전단키를 설치하였고, 연결보와 스티브 사이의 시공이음에서 미끄러짐을 방지하고자 연결보 단면 중심에 'U'형 철근을 추가로 배근하였다. 벽체와 동일한 지지 조건을 확보하도록 벽체를 모사한 스티브를 제작하였고, 실험 중 스티브가 연결보보다 먼저 파괴되지 않도록 충분한 배근과 압축강도 60 MPa 콘크리트로 타설하였다.

2.2 실험방법 및 계측

실험은 Fig. 3과 같이 연결보를 수직으로 세운 상태에서 하부 스티브는 앵커를 사용하여 고정시키고, 상부 스티브에 연결된 프레임에 수평력을 작용함으로써 횡하중

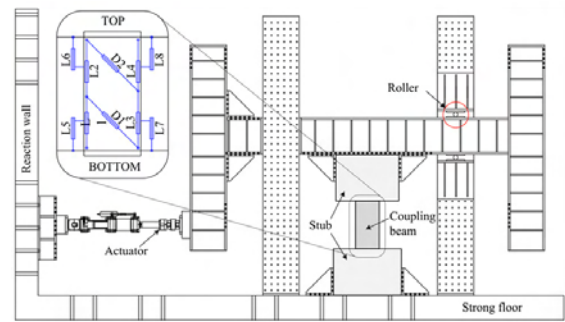


Fig. 3 Test setup

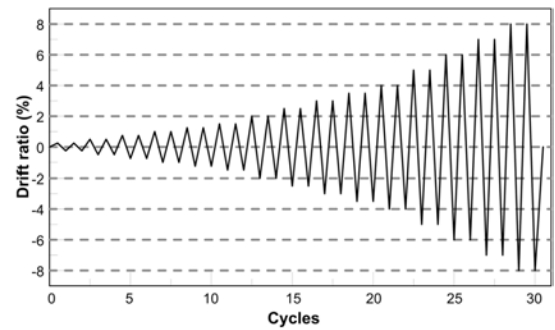


Fig. 4 Loading history

을 받는 연결보의 거동을 재현하였다. 횡하중에 대하여 연결보의 중심에서 모멘트가 0이 되도록 액츄에이터를 연결보의 중심에 위치시켜 가력하였다. 가력 시 상부 스티브가 회전하는 것을 방지하고자 상부 프레임 양쪽에 롤러를 이용하여 회전을 구속하고 수평이동만을 가능하게 하였다. 그리고 상하부 스티브에 스톱퍼(stopper)를 설치하여 실험체의 미끄러짐(slip)을 방지하였다.

가력방법은 변위제어를 통한 준정적 반복하중(quasi-static reversed cyclic load)하에서 Fig. 4와 같이 변위각 0.25%부터 최대 8.0%까지 사이클별 2회씩 가력하였다. 횡하중의 계측은 액츄에이터에 장착된 로드셀을 통하여 확보하였다. 실험체의 횡변위는 상부 스티브에 설치된 LVDT로 계측하고, 하부 스티브에도 LVDT를 설치하여 스티브의 미끄러짐 발생을 확인하고자 하였다.

연결보의 휨 변형과 전단 변형을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 수직 및 대각 LVDT를 설치하였으며, 연결보와 스티브 접합면에서의 회전 정도를 측정하기 위해 부재 외측에 수직 LVDT를 설치하였다. 그리고 철근의 변형률을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 대각철근, 수직철근, 그리고 수평철근에 변형률게이지(strain gauge)를 부착하였다.

2.3 재료시험

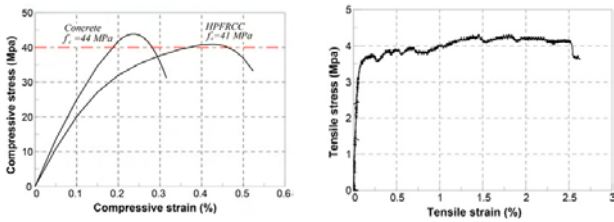
고성능 섬유 시멘트 복합체(HPFRCC)의 재료특성을 평가하기 위하여 압축강도 시험과 직접인장시험을 수행하였다. 이 연구에서는 폴리머(polymer)계열의 PVA섬유를 사용하였다. 사용한 재료의 특성은 Table 2에 정리하

Table 2 PVA fiber properties

| Tensile strength (MPa) | Elastic modulus (GPa) | Diameter (mm) | Length (mm) | Volume fraction (%) |
|------------------------|-----------------------|---------------|-------------|---------------------|
| 1600 | 25 | 0.039 | 12 | 2.0 |

Table 3 HPFRCC mixture proportion (unit: kg/m³)

| Cement | Fly ash | Silica fume | Water | Filler (CaCO ₃) | Super-plasticizer |
|--------|---------|-------------|-------|-----------------------------|-------------------|
| 489 | 374.9 | 32.6 | 366.8 | 684.6 | 3.3 |



(a) Compressive strength (b) Direct tensile of HPFRCC (dog-bone)

Fig. 5 Result of material test

Table 4 Mechanical properties of reinforcing bars

| Re-bar | Diameter (mm) | Yield stress f_y (MPa) | Tensile stress f_{st} (MPa) |
|--------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| D13 | 12.7 | 506 | 620 |
| D22 | 22.2 | 438 | 586 |

Table 5 Result of material test

| | Compressive strength f_{cu} (MPa) | Maximum compressive strain ϵ_{cu} (%) | Direct tensile stress (MPa) | Maximum tensile strain (%) |
|----------|-------------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|
| Concrete | 44 | 0.23 | - | - |
| HPFRCC | 41 | 0.46 | 4.3 | 2.5 |

었다. HPFRCC의 섬유는 전체 체적의 2%를 혼입하였고, 재료의 배합비는 압축강도 40 MPa를 발휘하도록 다수의 시험배합과 재료시험을 통하여 Table 3과 같이 최종 결정하였다. 일반콘크리트와 HPFRCC의 압축강도 시험체는 각각 3개씩 100×200(mm) 원주형 공시체를 사용하였고, 연결보 시험체와 동일한 조건으로 현장 양생하였다. Fig. 5(a)는 압축강도 시험 결과의 평균값으로 작성된 응력-변형도 곡선이며, 일반콘크리트와 HPFRCC는 모두 목표 압축강도인 40 MPa를 상회하는 것으로 나타났다. HPFRCC가 일반콘크리트 시험체보다 67% 더 큰 변형도에서 파괴가 발생하였고, 최대강도에 도달할 때의 변형도도 HPFRCC 시험체가 더 크게 나타났다. 하지만 활선 탄성계수는 일반 콘크리트가 HPFRCC보다 40% 더 큰 결과를 보였다. HPFRCC의 인장성능 평가를 위한 직접인장 시험은 25×50(mm)의 단면을 갖는 도그본(dog-bone) 시험체를 각각 3개씩 제작하여 수행하였고, 시험 결과는 공시체 시험값의 평균으로 정리하였다.

직접인장시험 결과, Fig. 5(b)와 같이 HPFRCC는 2.5%까지의 변형이 발생하며 파괴 시까지 연성적인 거동을 나타내었고, 시험체 전반에 걸쳐 다수의 균열이 발생하였으며 최종적으로 한 개의 균열에 국부적인 변형이 집중되면서 파단이 발생하였다. 이는 HPFRCC에서 2%이하의 낮은 체적비의 섬유를 혼입하여도 인장변형경화성질과 최대변형도가 2-5%정도 확보한다는 Naaman and Reinhardt⁽¹⁰⁾의 결과와 유사한 것이라 판단할 수 있다.

연결보 시험체에 배근된 철근 13 mm(D13), 22 mm(D22)의 인장시험을 통하여 수집한 각 철근의 기계적 특성을 Table 4에 요약하였다. 콘크리트 압축강도와 직접인장시험 결과를 Table 5에 정리하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

실험을 통하여 얻은 각 시험체의 하중-변위 관계곡선은 Fig. 6과 같다. 이력곡선의 가로축은 변위각으로 LVDT

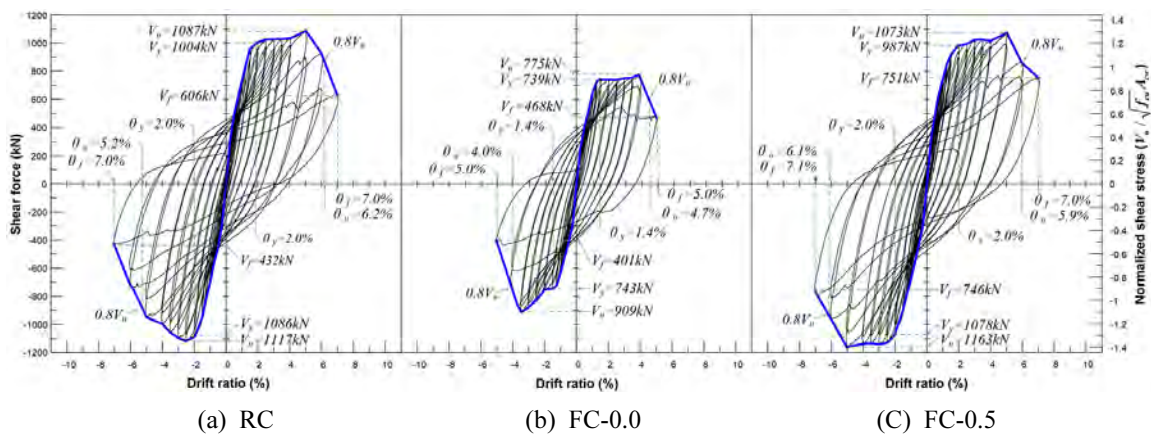


Fig. 6 Lateral force versus drift ratio response

Table 6 Summary of experimental results

| Specimen | V_y (kN) | θ_y (%) | V_u (kN) | θ_u (%) | V_f (kN) | θ_f (%) | Ductility ratio | |
|----------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|-------------------------------|-----|
| | | | | | | | $\mu (= \theta_u / \theta_y)$ | |
| RC | (+) | 1004 | 2.0 | 1087 | 6.2 | 606 | 7.0 | 3.2 |
| | (-) | 1086 | 2.0 | 1117 | 5.2 | 432 | 7.0 | 2.6 |
| FC-0.0 | (+) | 739 | 1.4 | 775 | 4.7 | 468 | 5.0 | 3.2 |
| | (-) | 743 | 1.4 | 909 | 4.0 | 401 | 5.0 | 2.8 |
| FC-0.5 | (+) | 981 | 1.7 | 1073 | 5.9 | 751 | 7.0 | 3.0 |
| | (-) | 1078 | 2.0 | 1163 | 6.1 | 746 | 7.1 | 3.0 |

Note) V_y : yield load (measured), V_u : maximum (peak) load (measured), V_f : failure load (measured)
 θ_y : yield drift (measured), θ_u : maximum (peak) drift (measured), θ_f : failure drift (measured), μ : ductility ratio

에서 얻은 연결보의 횡변위를 연결보의 길이로 나눈 값 ($\theta = \Delta/L$)이고, 세로축은 연결보에 액츄에이터로 작용한 횡하중 혹은 횡하중을 $\sqrt{f_{cu}} A_{cw}$ 로 일반화 시킨 값이다. 여기서, f_{cu} 는 콘크리트 공시체 시험을 통하여 얻은 압축 강도이고, A_{cw} 는 연결보의 단면적이다. 실험체의 이력곡선에서 찾은 항복하중(V_y), 항복변위각(θ_y), 최대하중(V_u), 최대변위각(θ_u), 파괴시 하중(V_f), 파괴시 변위각(θ_f), 연성비(μ)를 Table 6에 정리하였다.

항복변위각과 최대변위각은 Pan and Moehle¹⁴⁾가 사용한 방법에 따라, 최대하중의 2/3에 해당하는 점과 원점을 지나는 직선이 최대강도 시 횡축에 평행한 직선과 접하는 교점에 해당하는 변위각을 항복변위각으로 산정하였다. 최대변위각은 강도가 최대하중의 80%까지 감소되었을 때의 변위각이고, 파괴 시의 변위각은 실험체를 최종 파괴 시까지 가력하여 실험체가 파괴되며 급격한 하중의 감소가 발생한 때의 변위각으로 결정하여, Fig. 6에 나타내었다. 연성비는 최대변위각을 항복변위각으로 나눈 값 (θ_u/θ_y)으로 산정하였다.

RC 실험체는 ACI 318(2011)의 두 번째 횡구속 철근 상세에 따라 제작된 철근콘크리트 연결보 기준 실험체로 Fig. 6(a)와 같이 변위각 4%의 변형이 발생할 때까지 강도 저감이 발생하지 않고 안정적인 거동을 나타냈으며, 최종 파괴는 변위각 7%에서 발생하였다.

FC-0.0 실험체는 RC 실험체와 동일한 양의 대각철근이 배근되어 있으나, 보 둘레의 횡구속 철근이 전혀 없고 일반콘크리트 대신 HPRCC를 사용한 실험체로 이력곡선은 Fig. 6(b)에 나타내었다. 변위각 3%까지는 강도의 저감 없이 저항하는 것으로 나타났으며, 4%에서도 최대강도의 80%이상의 강도를 보유했다. 최종적으로 변위각 5%에서 파단이 발생하여 실험을 종료하였다. 횡구속 철근이 없는 FC-0.0 실험체는 RC 기준실험체와 비교하여 그 성능을 저하되었지만 섬유보강의 효과로 상당한 변형 능력과 강도를 발현한 것으로 판단된다.

횡구속 철근량을 RC 실험체의 1/2을 배근한 FC-0.5 실험체는 변위각 5%까지 큰 강도저감 없이 거동하였으며, 변위각 7%에 도달한 후 대각철근이 파단되어 실험을 중

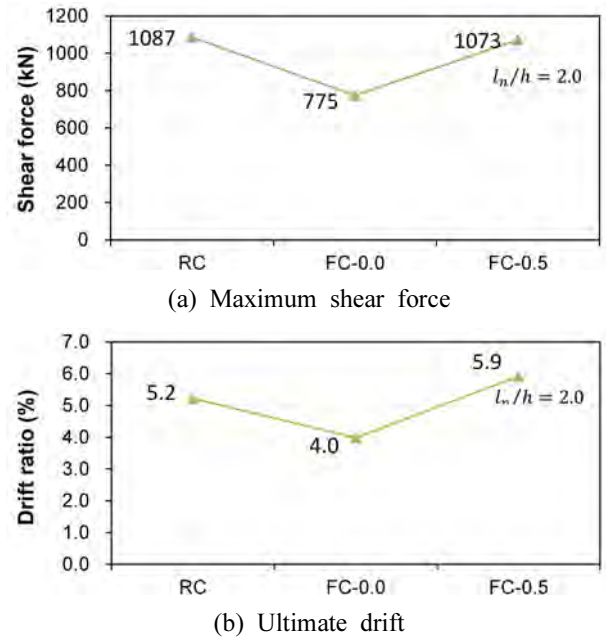


Fig. 7 Comparison of max. force and ultimate drift

료하였다. 실험 결과, 변형능력과 강도 모두 기준 실험체와 유사한 것으로 관측되었다. 이를 통해 횡구속 철근의 상당부분을 섬유보강으로 대체할 수 있음을 확인하였다.

3.2 최대강도, 최대변위 비교

각 실험체들의 최대강도와 최대변위를 정가력과 부가력 중 작은 값을 비교하여 Fig. 7(a), (b)에 정리하였다. 횡구속 철근이 없는 FC-0.0 실험체의 최대강도는 775 kN으로 RC 기준실험체의 최대강도 1087 kN의 71%를 보유하는 것으로 관측되었다.

횡구속 철근을 기준 실험체의 1/2로 배근하고 HPRCC로 보강한 FC-0.5 실험체는 1073 kN으로 RC 실험체와 유사한 강도를 보였다. 이는 섬유가 횡구속 효과 뿐 아니라 강도 증진에도 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

최대하중의 80%까지 감소되었을 때의 변위각인 최대

변위각을 비교하면 RC 실험체는 5.2%를 나타내었고, FC-0.0 실험체는 4.0%로 기준 실험체보다 낮은 최대 변위각을 나타냈다. FC-0.5 실험체는 5.9%로 기준 실험체와 유사한 변위각을 보였다. 이 실험체는 Table 6과 같이 기준 실험체와 전반적으로 유사한 결과를 보여, 섬유유리의 가교 작용이 연결보의 연성증진에 영향을 미친 것으로 판단할 수 있다.

3.3 균열 및 파괴양상

RC 실험체의 경우 변위각 0.25%에서 초기 수평균열이 연결보와 벽체의 경계부분에서 발생하였고, 하중이 증가됨에 따라 수평균열이 사인장 균열로 발전되었다. 변위각 1.0%에서는 사인장 균열이 실험체 전반에 걸쳐 분포하였다. Fig. 8(a)와 같이 변위각 2.0%에서 사인장 균열 폭은 1.5 mm로 나타났으며, 대각철근은 항복하지만 횡보강근은 항복하지 않아 실험체의 전단하중을 대각철근이 주로 저항하는 것을 관측하였다. 변위각 5.0%에서는 4.0 mm이상의 균열이 발생하였다(Fig. 8(b)). 변위각 7.0%에 도달하였을 때, 연결보의 경계면에서 모재의 탈락 및 대

각철근의 파단이 발생하면서 실험이 종료되었고, Fig. 8(c)와 같이 최종 균열 양상을 보였다.

FC-0.0 실험체의 경우 변위각 0.25%에서 초기 수평균열이 실험체 상부에서 발생하였고, 변위각 0.5%에서 초기 사인장 균열이 중앙부에서 발생하였다. 변위각 1.5%에서 사인장 균열이 갑자기 증가하여 실험체 좌측 상부와 우측 하부를 가로지르는 양상을 보이며, 대각철근이 항복하였다. Fig. 8(d)와 같이 변위각 2.0%에서 균열 폭은 3.4 mm의 큰 균열로 발전하였다. 변위각 4.0%에서 균열 사이의 섬유유리 저항능력을 상실하며 갑작스럽게 균열 폭이 15 mm로 증가하였다. 최종적으로 Fig. 8(e)의 변위각 5.0%에서 사인장 균열 폭이 증가하며 연결보 복부에 커다란 균열양상을 보였고, 대각철근의 파단 발생 전에 실험을 종료하였다. 이는 섬유유리로 일정 이상의 횡구속 효과를 가지지만 RC 기준 실험체만큼의 횡구속 효과를 발휘하지 못한 것으로 판단된다.

FC-0.5 실험체는 변위각 0.25%에서 초기 수평균열이 실험체 하부에서 발생되었고, 이후 하중이 증가되면서 사인장 균열이 나타났지만, RC 실험체와는 달리 미세한 균열이 실험체 전반에 다수 발생하였다. 또한, 섬유유리의 가교 작용으로 Fig. 8(g)와 같이 변위각 2.0%에서 대각철근이 항복하였고, 균열 폭은 0.5mm로 기준 실험체보다 작은 균열 폭을 나타내었다. FC-0.5 실험체의 횡보강근은 기준 실험체의 횡보강근보다 큰 변형률을 보였지만 항복하지 않아 섬유유리 횡보강 효과를 일정수준 나타낸 결과로 볼 수 있다. 변위각 5.0%에서 균열 폭은 1.4 mm로 균열 폭이 크게 증가하지 않았으며(Fig. 8(h)), 이후 변위각 7.0%에서 균열 폭이 큰 증가 없이 대각철근의 파단과 함께 실험을 종료하였다. Fig. 8(i)의 최종파괴의 균열양상을 보면, 섬유유리의 사용으로 국부적인 균열 폭의 증가 대신에 미세균열의 증가로 사인장 균열의 벌어짐으로 인한 파괴를 막을 수 있던 것으로 판단된다.

3.4 강도 및 강성저하

각 실험체의 강도 변화를 비교하기 위해 각 사이클별 최대하중을 연결하여 Fig. 9(a)에 나타내었다.

FC-0.0 실험체의 경우 RC 실험체에 비해 정가력 시 최대강도가 29% 낮게 나타났고, 부가력 시에도 23% 낮은 강도를 보였다. 횡구속 철근 없이 섬유유리만으로 일정수준의 강도 증진 효과를 발휘하지만 기준실험체와 같은 강도를 유지하기는 어려운 것으로 관측되었다.

FC-0.5 실험체는 RC 실험체와 비교했을 때 정가력, 부가력 시 모두 4% 이내의 적은 차이로 유사한 강도 변화를 보였고 두 실험체 모두 최대강도 발현 이후 강도 저하되는 현상을 보였다.

또한, 변위 증가에 따른 각 실험체의 강성저하특성을 비교하여 Fig. 9(b)에 나타내었다. 강성저하에 대한 평가는 각 사이클별 정가력과 부가력 시 최대하중에 대한 절

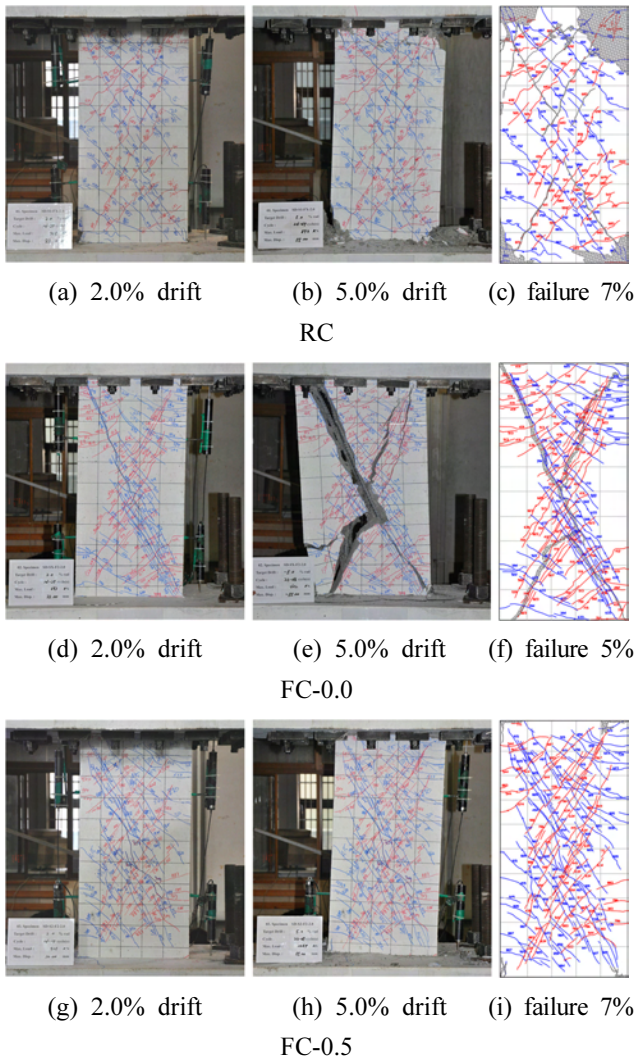
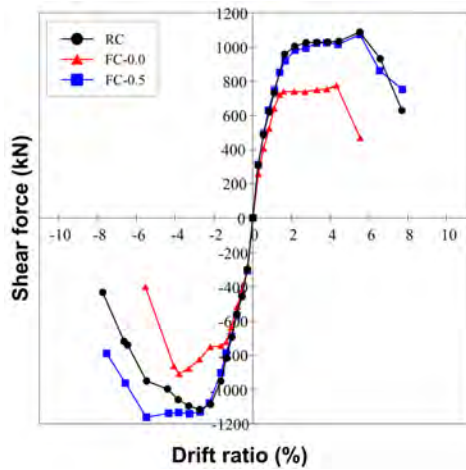
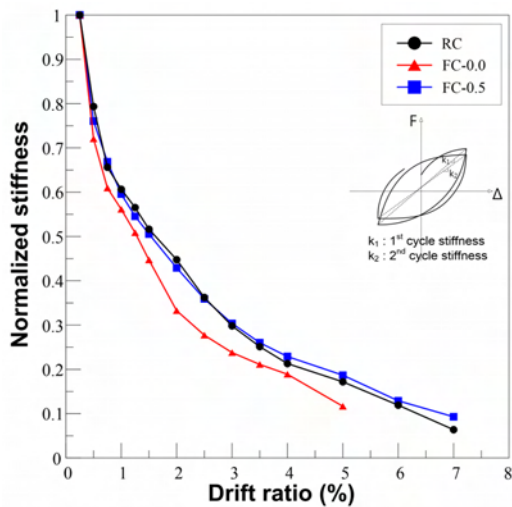


Fig. 8 Crack progression and failures



(a) Strength degradation



(b) Stiffness degradation

Fig. 9 Strength and stiffness degradation

대각의 합을 해당 변위의 절대값의 합으로 나눈 값(peak-to-peak stiffness)으로 산정하였다. FC-0.0 실험체는 RC 실험체에 비해 급격한 강성저하 특성을 나타내었다. 하지만 FC-0.5 실험체는 변위각 3.0% 이후 완만한 강성저하를 보이면서 RC 실험체와 유사한 특성을 보였다. 이는 섬유유리의 우수한 가교작용이 횡보강근의 역할을 일정수준 제공하여 연결보의 강성을 개선한 것으로 판단된다.

3.5 에너지소산능력

에너지소산능력은 내진성능을 평가하는 척도로서, 에너지소산능력이 크면 실험체가 보유하고 있는 내진성능이 우수한 것으로 평가할 수 있다. 누적에너지소산은 하중-변위 곡선이 둘러싸고 있는 면적의 합으로 산정되었고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

각 실험체들의 에너지소산능력은 초기 변위각에서 비슷한 소산능력을 가지고 있지만, 횡구속 철근이 없는 FC-0.0 실험체가 가장 낮은 소산능력을 보였다. 횡구속 철근을 기준실험체의 1/2로 배근한 FC-0.5 실험체의 최종

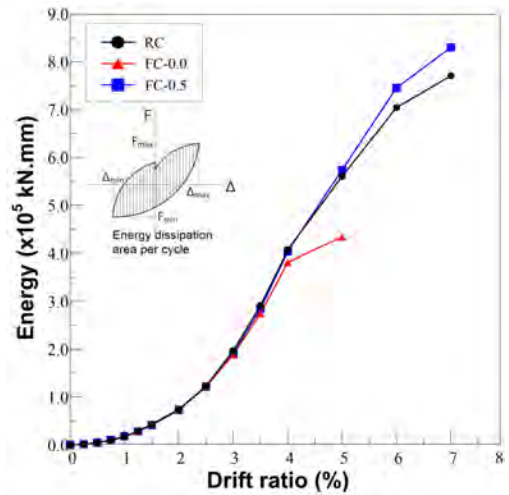


Fig. 10 Cumulative energy dissipation

에너지 소산능력은 RC 기준 실험체보다 7.7% 크게 나타나 가장 우수한 에너지소산능력을 보유한 것을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 현행 ACI 318(2011)에서 요구하는 대각 철근을 갖는 철근콘크리트 연결보의 대체 상재로 제안된 대각철근을 갖는 HPRCC 연결보의 이력거동을 실험을 통하여 평가하였다. 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) ACI 318(2011) 기준에 따른 대각철근을 갖는 철근 콘크리트 연결보 실험체는 변위각 5%의 변형능력을 보유하고 있었다. 이는 기존 연구 중 Galano and Vignoli의 형상비 1.5 연결보가 변위각 4%의 변형능력을 나타낸 것과 같이 충분한 내진성능을 보유한 것으로 확인하였다.
- 2) 연결보의 이력거동에서 HPRCC의 영향을 알아보기 위한 실험체로 횡구속 철근을 사용하지 않고 섬유유리로 대체한 극단적인 실험체의 경우 변위각 4%까지 변형능력을 보유하고 있었다. 이것은 HPRCC의 횡구속 능력이 기준실험체에는 미치지 못하지만 일정수준 이상의 전단보강과 횡구속에 기여하는 것을 판단된다.
- 3) 횡구속 철근을 기준실험체의 1/2만 배근하고 HPRCC를 사용한 실험체는 기준실험체와 비교하였을 때 유사하거나 그 이상의 강도, 변형능력 그리고 에너지소산능력을 보유하는 것을 확인하였다. 이는 섬유유리가 횡구속 철근을 대신할 수 있음을 보이는 것이다. 또한 $0.5\sqrt{f_{ck}}$ 이상의 전단수준이 요구되는 연결보의 경우 현실적으로 배근이 어렵다는 것을 고려하면 HPRCC를 사용함으로써 횡구속 철근량을 감소시켜 시공성 개선에 기여할 수 있다는 점에서 고무적인 결과이다.
- 4) 높은 전단력을 받는 연결보의 경우, 이 연구에서 제

안하는 대각철근을 갖는 HPRCC 연결보를 적용하여 배근 상세의 단순화, 강도 및 연성 확보 뿐 아니라 프리캐스트 부재로 생산함으로써 시공성 개선도 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(No. 2005-0049406, 2012-R1A2A2A06045129)과 2011년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단(2011-0028552)의 지원을 받아 수행된 연구이고 이에 감사드립니다.

References

1. Paulay, T. and Binney, J. R., "Diagonally Reinforced Concrete Beams of Shear Walls," *ACI Special Publication* Vol. 42, 1974, pp. 579-598.
2. Tassios, T. P., Moretti, M., and Bezas, A., "On the Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Coupling Beams of Shear Walls," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 711-720.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318-08)," *American Concrete Institute*, 2005, 2008, pp. 327-335.
4. Harries, K. A., Fortney, P. J., Shahrooz, B. M., and Brienen, P. J., "Practical Design of Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beams-Critical Review of ACI 318 Requirements," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 6, 2005, pp. 876-882.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11)," *American Concrete Institute*, 2011, pp. 360-369.
6. Ministry of Land Infrastructure and Transport, *Concrete Design Code*, Korea Concrete Institute, 2012, pp. 259-260.
7. Barney, G. B., Shiu, K. N., Rabbat, B. G., Fiorato, A. E., Russell, H. G., and Corley, W. G., "Behavior of Coupling Beams under Load Reversals," *Portland Cement Association*, 1980, pp. 1-22.
8. Galano, L. and Vignoli, A., "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 6, 2005, pp. 876-885.
9. Fortney, P. J., Rassati, G. A., and Sharooz, B. M., "Investigation on Effect of Transverse Reinforcement on Performance of Diagonally Reinforced Coupling Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 105, No. 6, 2008, pp. 781-788.
10. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites-HPFRCC. High Performance Fiber Reinforced Cement Composite 2 (HPFRCC 2)," *Proceedings of the Second International RILEM Workshop*, RILEM Publications S.A.R.L., June 1996, pp. 1-24.
11. Yun, H. D., Kim, S. W., Jeon, E. and Park, W. S., "Seismic Performance of HPFRCC Coupling Beams with Diagonal Reinforcement," *Architectural Research*, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 57-64
12. Canbolat, B. A., Parra-Montesinos, G. J., and Wight, J. K., "Experimental Study on Seismic Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composite Coupling Beams" *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 1, 2005, pp. 159-166.
13. Naish, D., Wallace, J. W., Fry, J. A., and Klemencic, R., "Reinforced Concrete Link Beams: Alternative Details for Improved Construction," *UCLA-SGEL Report 2009-06*, Structural & Geotechnical Engineering Laboratory, University of California at Los Angeles, 2009, pp. 1-103.
14. Pan, A. and Moehle, J. P., "Lateral Displacement Ductility of Reinforced Concrete Flat Plates" *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 3, 1989, pp. 250-258.

요약 병렬전단벽시스템은 경제적이고 효율적인 구조시스템이지만, 연결보의 복잡한 철근상세가 요구된다. 이를 보완하고자 ACI-318에서는 개선된 철근상세를 제안하고 있지만 과도한 횡보강근으로 현장 적용에 어려움이 따른다. 이 연구에서는 횡보강 철근량을 감소시킨 대각철근을 갖는 HPRCC 연결보 상세를 제안하고, 형상비 2.0 실험체를 통해 현행 기준에 만족하는 대각철근을 갖는 철근콘크리트 연결보와 이력거동을 비교 평가하였다. 그 결과, HPRCC의 횡구속 효과를 확인하였고, 횡구속 철근을 기준의 1/2로 배근하고 HPRCC로 보강한 연결보는 현행기준에 따른 연결보와 유사한 내진성능을 보였다. HPRCC 보강을 통해 대각보강된 철근콘크리트 연결보의 횡구속 철근량을 감소시킴으로써 철근상세의 단순화가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 연결보, 병렬전단벽 시스템, 대각철근, 고성능섬유시멘트복합체, cyclic behavior