

일방향 반복가력을 받는 HPFRCC로 보강한 비내진 기 둥의 이력거동

Cyclic Behavior of the HPFRCC Column With Short Lap Splices Under Unidirectional Loading

강호재¹⁾ · 한상환^{2)*}

Kang, Ho Jae¹⁾ · Han, Sang Whan^{2)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 대학원생, ²⁾한양대학교 건축공학과 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Architecture Engineering, Hanyang University, ²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

/ A B S T R A C T /

The columns of older reinforced concrete (RC) buildings generally have limited reinforcement details. Thus, they could be vulnerable to earthquake ground motions, leading to partial or complete building collapse. In this study, high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) was applied to RC columns to improve their seismic behavior. Experimental tests were conducted with two full-sized specimens with limited reinforcement details, including short lap splices, while unidirectional loadings were applied to the specimens. The seismic behavior of RC columns was substantially improved by using HPFRCC.

Key words: Older RC column, Seismic behavior, HPFRCC, Unidirectional loading, Short lap splices

1. 서론

중력하중만을 고려하여 설계된 기존 콘크리트 구조물 (existing reinforced concrete structure)들은 대부분 1970년대 이전에 지어졌다[1-3]. 이러한 건물의 기둥은 짧은 겹침 이음과 넓은 횡보강간 간격이라는 문제점을 가지고 있어, 현행 내진설계 기준에 적합하지 않다[3, 4]. 이와 같은 배근 상세는 지진하중과 같은 횡하중에 취약하다.

따라서 지진 발생 시 모멘트가 집중되는 기둥 단부의 휨철근이 항복하기 전에 겹침이음 파괴가 발생할 수 있다[5]. 과거 실험 연구들은 기존 RC 건물의 기둥들이 제한된 강도, 강성, 그리고 에너지 소산 능력으로 좋지 않은 이력 거동을 보이는 것을 확인하였다[1, 6].

최근 연구에서는 다양한 부재에 복잡한 철근 상세를 대신해 고성능 섬유 강화 시멘트 복합재 (HPFRCC)를 적용시켜 실험을 진행하였다[7-11]. 하지만 기존 RC 구조물의 기둥에 HPFRCC를 보강한 실험 연구는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 PVA 섬유로 구성된 고성능 섬유 강화 시멘트 복합재 (HPFRCC, high-performance fiber-reinforced cementitious composite)를 사용하여 기존 RC 기둥의 거동을 향상시키고자 하였다. HPFRCC는 인장 변형 유지력이 상당하여 콘크리트 대비 균열 제어 능력 및 인장 연성이 우수하여 구조 부재의 성능 향상에 활용할 수 있는 것으로 보고되었다[12].

본 연구에서는 실제 크기의 제한된 철근상세를 갖는 기둥 실험체 2개를 제작하여 일방향 하중 가력 실험을 진행하였다. 한 개의 실험체는 RC 실험체이고, 다른 하나의 실험체는 HPFRCC로 보강된 실험체이며, 두 실험체의 철근 상세는 동일하다.

2. 실험 계획

2.1 실험체 상세

본 연구는 고성능 섬유 강화 시멘트 복합재 (HPFRCC)가 비내진상세를 갖는 기둥의 거동을 향상시키는 정도를 분석하기 위해 HPFRCC 보강 여부를 변수로 비내진 기둥 실험체 2개를 제작하였다: (1) 비내진 기둥 실험체 (N-C), (2) HPFRCC 보강한 비내진 기둥 실험체 (H-C)로 명하였다.

*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swhan@hanyang.ac.kr

(Received September 8, 2022; Revised October 14, 2022; Accepted October 18, 2022)

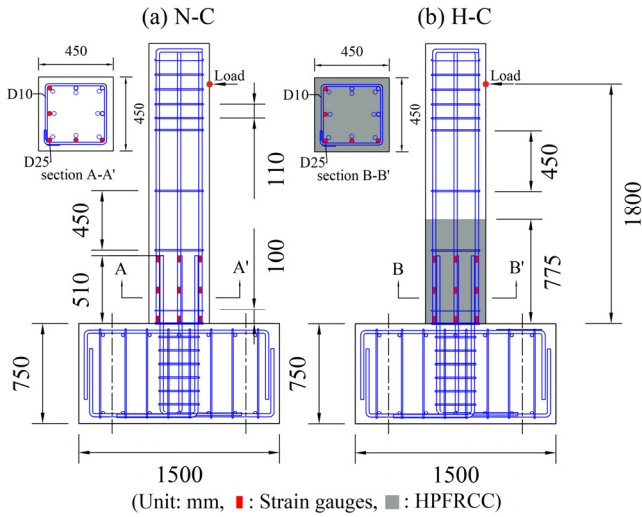


Fig. 1. Details of column specimens

Table 1. Column specimen properties

Specimen	b_w (mm)	h (mm)	L (mm)	l_d (mm)	HPFRCC (mm)
N-C	450	450	1800	510	0
H-C	450	450	1800	510	775

Fig. 1은 두 기둥 실험체의 치수와 철근 상세이다. 두 실험체 모두 동일한 철근 상세를 가지고 있다. 콘크리트의 기준압축강도는 21 MPa, 철근의 기준 항복강도는 420 MPa로 계획하였다.

각 기둥 실험체는 450 mm × 450 mm (A_y)의 정사각형 단면이고, 기둥 하부에서 하중 지점까지 높이(L)는 1800 mm이다. Fig. 1b에 나타난 바와 같이 H-C 기둥은 기둥철근 조립 후 PVA 섬유가 2% 포함된 시멘트복합체를 실험체의 하부에서 775 mm까지 거푸집 안에 타설하였다.

본 실험체에 사용된 철근상세는 ACI 318 [13]과 같은 현행기준에서 요

구하는 상세에 미치지 못한다. Fig. 1에서 보여지듯이 직경이 25.4 mm인 주철근(D25)을 8개 사용했으며, 겹침이음길이(l_d)는 $20d_b (=508 \text{ mm})$ 이다. 이는 ACI 318 [13]에 제시된 $38d_b(l_{d-A})$ 의 53%이고, 여기서 d_b 는 철근의 직경을 의미한다. 직경이 9.5 mm인 횡보강근(D10)은 90° 갈고리를 사용했으며, 450 mm 간격으로 배근 되었다. Table 1에 실험체의 제원을 나타냈다.

실험체에 일방향 하중 가력 시 겹침이음부의 철근 변형을 분석하기 위하여 스트레인 게이지를 집중적으로 부착하였다.

2.2 재료 시험

Fig. 2a는 콘크리트와 HPFRCC의 압축강도 시험 결과 평균값을 보여 준다. 압축강도 시험은 KS F 2403 [14]과 KS F 2405 [15]에 따라 진행하였다. 직경 100 mm, 높이 200 mm인 원형 공시체를 각각 4개씩 제작하여 콘크리트와 HPFRCC를 타설 했으며, 28일 양생 후 압축강도 시험을 수행하였다. HPFRCC의 배합비는 Table 2에 나타내었다.

콘크리트의 압축강도(f'_c)는 25 MPa, HPFRCC의 압축강도는 29 MPa로 측정되었다. 최대 압축강도 시 변형률(ϵ_c)은 각각 0.002와 0.0041로 확인하였다. 이는 HPFRCC의 탄성계수($E_c = f'_c / \epsilon_c$)가 보통 콘크리트보다 낮음을 나타낸다. Fischer and Li [16]와 Zhou et al. [17] 연구에서 큰 골재를 사용하지 않고 배합한 HPFRCC의 탄성계수가 보통 콘크리트보다 낮고, 더 높은 변형률에서 압축강도에 도달한다고 보고한 바와 같은 결과가 나타났다.

HPFRCC의 인장시험 결과 평균값을 응력-변형률 그래프로 Fig. 2b에 나타냈다. 단면적 25 mm × 50 mm의 Dog bone 형태로 시험체 4개를 제작하여 시험을 실시하였다. 평균 인장강도는 3.25 MPa로 측정되었으며, 저하됐을 시 상용하는 값으로 0.03이 측정되었다.

기둥 실험체에 사용된 철근의 인장강도 시험을 위해 KS B 0802 [18]에 따라 수행하였다. 주철근과 횡보강근의 항복강도(f_y)는 각각 489 MPa와

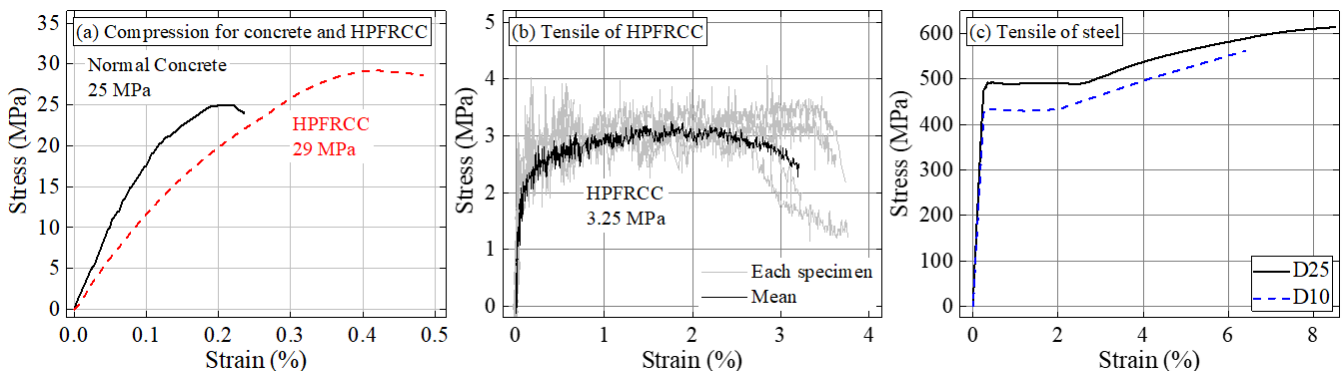


Fig. 2. Stress-strain curves of materials

Table 2. Mixing ratio of HPFRCC

Cement (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Filler (CaCO ₃) (kg/m ³)	Super plasticizer (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	W/B* (%)	Fiber volume ratio (%)
480	32	372	680	3.5	360	20	2

*W=Water, B=Binder (cement, silica fume, fly ash, filler)

Table 3. Properties of materials

Material	Compressive strength (MPa)	Maximum compressive strain (%)	Tensile strength (MPa)	Maximum tensile strain (%)	Steel	Yield strength (MPa)	Yield strain (%)
Concrete	25	0.2	-	-	D10	434	0.21
HPFRCC	29	0.41	3.25	3.01	D25	489	0.23

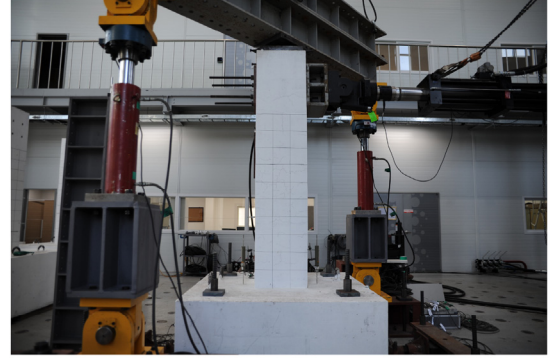
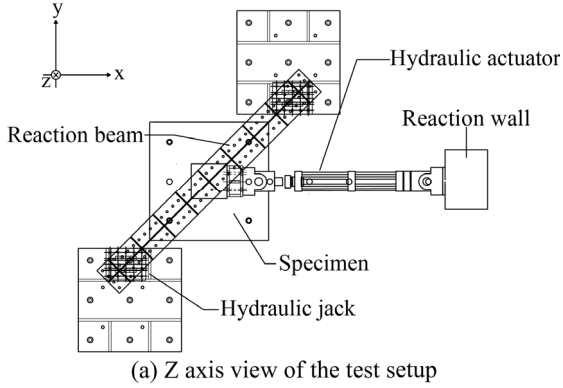


Fig. 3. Test setup

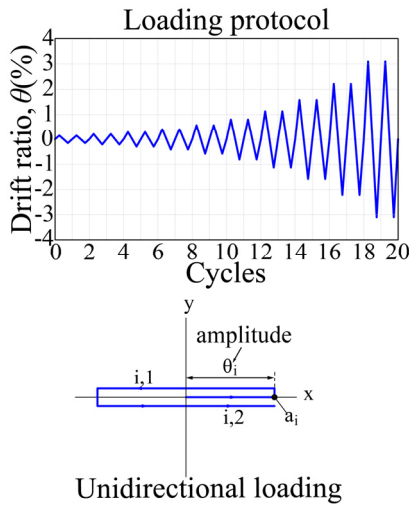


Fig. 4. Loading protocol and unidirectional loading

434 MPa로 측정되었고, 항복변형률은 0.23%와 0.21%로 측정되었다 (Fig. 2c).

Table 3에 콘크리트, HPFRCC, 그리고 철근의 재료 시험 결과를 나타냈다.

2.3 실험체 설치 및 가력 계획

실험체 설치는 Fig. 3에서 보여준다. 기둥 실험체에 축하중(P)을 가하기 위해 두 개의 유압 잭(hydraulic jack)을 설치해 축력비($v = P/A_g f'_c$) 20%로 가력 하였다. 45도 방향의 축력 프레임 (Fig. 3b)을 사용한 것은 추후 이 방향 횡하중 실험시 액츄에이터 방향과 간섭을 피하기 위한 것이다. 일방향 반복 횡하중을 적용시키기 위해 기둥 상부에 한 개의 액츄에이터를 x방향으로 수평하게 설치했다.

수평 하중 가력 시 실험체의 전도현상을 방지하기 위하여 고강도 앵커볼트를 사용해 기둥의 기초 콘크리트를 반력바닥에 고정시켰다.

Fig. 4는 본 연구에서 적용한 변위제어로 이뤄진 일방향 하중이력이다. FEMA 461 [19]의 2.9.2절에 따라 첫 변위비(θ)는 0.15%에서 시작하였다. 또한, 한단계를 동일한 변위비로 2회 반복가력 하였으며, 다음 단계 변위비는 이전 변위비 보다 1.4배씩 증가하였다.

3. 실험 결과

3.1 하중-변위 곡선

모든 실험체의 하중-변위 이력곡선을 Fig. 5에 나타냈었다. V_u 는 최대 전단강도, θ_u 는 최대 강도에 도달한 이후 20% 저하됐을 때의 변위비, 그리고 θ_f 는 실험 종료 시 변위비이다. 본 연구에서 N-C와 H-C 실험체의 계산된 전단강도 V_{n-M_n} 은 P-M 그래프를 통해 얻은 기둥의 모멘트 강도(M_n)를 L 로 나눈 값인, $V_{M_n}(= M_n/L)$ 값과 ACI 318 [13] Chapter 22.5에 제시된 V_{ACI} 값 중 작은 값이다. $V_{n-0.53M_n}$ 은 짧은 겹침이음길이($l_d = 0.53l_{d-A}$)로 배근된 종방향 철근의 전단강도이다. 겹침이음부 주철근에 작용하는 인장응력이 $0.53f_y$ 로 계산했다. Table 4에 실험체들의 계산 및 측정된 값을 요약하였다.

N-C 기둥 실험체의 최대 강도(V_u)는 186 kN이며, 기둥 하부에 발생한 첫 대각 균열이 변위비 1.13%에서 발생되었다. 최대 내력 발생 후 바로 다음 이력 단계($\theta=1.58\%$)에서 급격한 강도 저하가 발생하여 실험을 종료하였다. 측정된 최대 강도가 계산된 전단강도(V_{n-M_n})에는 도달하지 못하고, 짧은 겹침이음길이를 고려한 $V_{n-0.53M_n}$ 과 유사한 것으로 미루어 볼 때, 기존 RC 기둥 실험체는 부차파괴로 인하여 내력 저하가 발생해 파괴된 것으로 확인하였다.

Table 4. Test results for specimens

Specimen	Loading direction		V_u (kN)	θ_u (%)	θ_f (%)	V_{M_n} (kN)	V_{ACI} (kN)	V_{n-M_n} (kN)	$V_{n-0.53M_n}$ (kN)
N-C	x	(+)	186	1.49	1.72	233	330	233	180
		(-)	202	1.40	1.68				
H-C	x	(+)	265	3.52	8.51	233	330	233	180
		(-)	243	3.48	8.51				

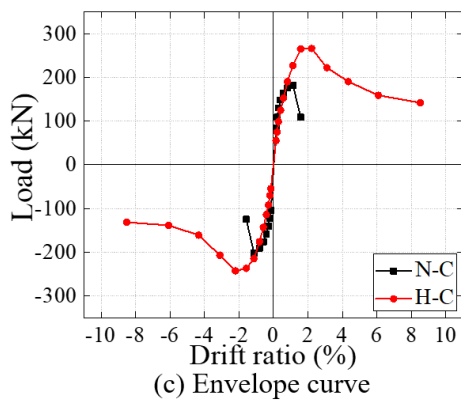
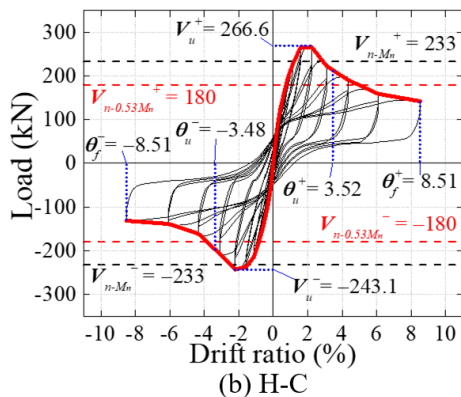
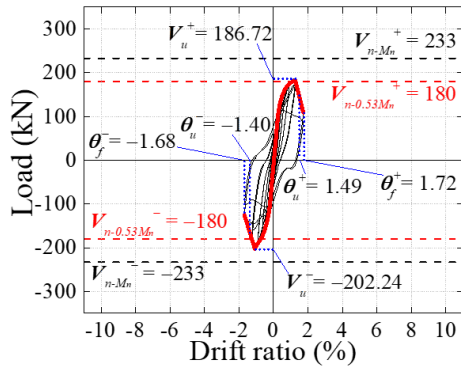


Fig. 5. Cyclic and envelope curves

HPFRCC를 보강한 실험체 H-C는 변위비 2.21%에서 최대 전단강도 (266 kN)를 발현해 계산된 전단강도에 도달하였다. 이후 점진적인 강도 저하가 나타났다. 또한, 변위비에 따라 하중 변화도 최소화 되고 있어 핀칭 (pinching) 현상이 두드러지는 것을 확인하였다. HPFRCC의 재료 특성으로 인해 이력 거동에 있어 실험체 N-C와는 심한 차이를 보였다.

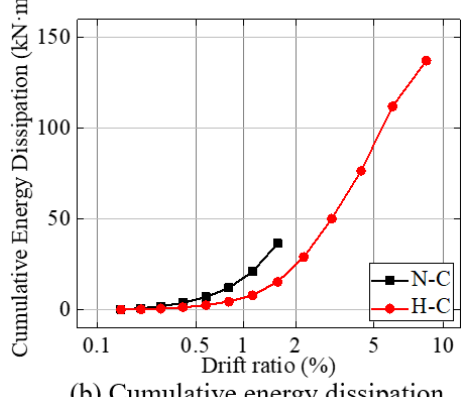
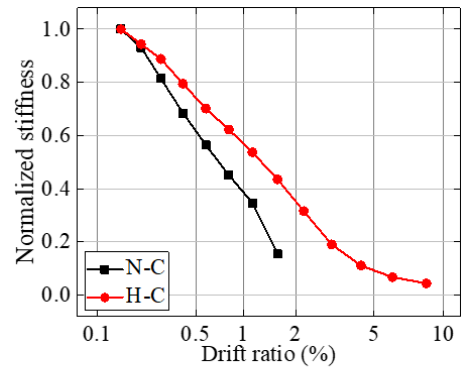


Fig. 6. Normalized stiffness and cumulative dissipated energy

실험체 H-C가 N-C에 비해 40% 높은 최대 내력을 보유했으며, 80% 이상의 변위를 보였다. 이는 기존 RC 기둥에 HPFRCC 적용이 이력 거동을 전반적으로 크게 향상키는 것을 나타낸다.

3.2 강도보유능력 및 에너지 소산

N-C와 H-C 기둥 실험체들의 강도보유능력(strength retention capacity)을 평가하기 위해 변위비와 강성을 초기 강성으로 정규화하여 Fig. 6a에 나타내었다 [20]. 강성은 각 단계별 첫 사이클에서 최대 변위와 최소 변위에 상응하는 점들을 이은 직선의 기울기로 계산하였다. 초기 강성은 변위비 0.15%의 첫 사이클에서 두 지점을 연결한 직선의 기울기이다.

실험체 N-C와 H-C의 초기 강성은 각각 24.58, 20.24 kN/mm로 나타났다. 변위비 0.21%부터 기존 RC 기둥 실험체인 N-C의 정규화된 강성이 HPFRCC로 보강된 기둥 실험체 보다 강성 저하가 심하게 발생하는 것을 볼 수 있었다. N-C 실험체가 최대 내력을 발현한 시점인 변위비 1.13%에서

의 강성은 초기 강성보다 65% 저하되었고, 동일한 변위비에서 H-C 경우 46% 감소하였다. 이를 토대로 HPFRCC 보강이 강도 손실을 억제하는 것을 알 수 있었다.

구조부재의 내진성능을 평가하는데 중요한 요소인 에너지 소산 능력을 분석하기 위해 Fig. 6b에 변위비에 따른 누적 에너지 소산량을 나타냈다. 실험체의 누적 에너지 소산량은 매 단계 별 하중-변위 이력 곡선의 면적 합으로 계산하였다.

기존 RC 기둥 실험체와 HPFRCC 보강된 기둥 실험체의 최종 누적 에너지 소산량은 각각 36.5 kN·m와 137.35 kN·m로 나타났다. HPFRCC를 적용하였을 때 300% 이상의 에너지 소산량을 보였으며, 이는 HPFRCC 보강으로 인해 기둥의 내력이 향상됨을 의미한다.

3.3 철근 변형 및 부착 강도

겹침이음부에 부착한 스트레인 게이지를 토대로 종방향 철근의 변형률을 Fig. 7에 나타내었다. D25의 항복 변형률(ϵ_y)은 0.0023이다.

N-C 기둥 실험체는 변위비 1.13%에서 종방향 철근의 최대 변형률이 나타났지만 항복 변형률을 초과하지 않았다. 이는 겹침 이음으로 배근된 실험체 N-C의 종방향 철근이 항복 강도에 도달하기 전에 겹침이음파괴가 발생하였기 때문이다.

실험체 H-C는 N-C와 달리 항복 변형률 보다 큰 변형률이 변위비 1.58%에서 나타났다. 항복 변형률을 초과한 이후 변형률 감소가 발생하였는데, 이는 겹침이음 배근한 부분의 종방향 철근에서 미끄러짐(slip)이 발생한 것으로 볼 수 있다.

이와 같은 결과는 HPFRCC 보강이 짧은 겹침이음부의 철근 변형을 향상시키고 겹침이음파괴를 지연하는 것에 기여함을 나타낸다.

Fig. 8은 계측된 변형률을 바탕으로 구한 부착강도(u)를 변위비에 따라 나타낸 것이다. 부착강도는 식 (1)로 계산하였다.

$$u = \frac{f_s d_b}{4l_d} \quad (u_y = \frac{f_y d_b}{4l_d}) \quad (1)$$

여기서 f_s 는 종방향 철근의 응력이며, 변형률에 탄성계수를 곱한 값이다. u_y 는 부착 항복강도로 f_s 에 f_y 를 대입하여 계산하였다.

H-C는 N-C보다 높은 부착 강도를 보였으며, 항복 부착 강도를 초과했

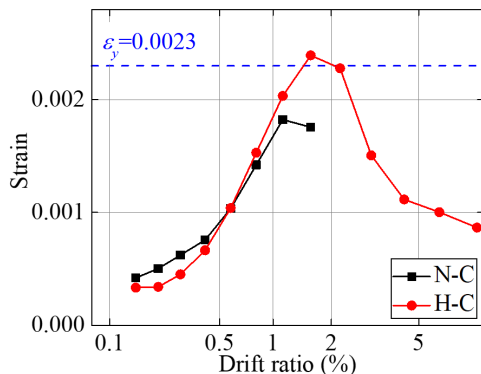


Fig. 7. Strain of longitudinal reinforcement

다. 또한, 실험체 N-C보다 강도 저하가 심하게 발생하지 않았고, 변위비 8.51%에서 파괴가 되었다.

두 실험체 모두 겹침이음파괴로 인하여 실험이 종료되었다. 하지만 HPFRCC 사용이 부착 강도 발현과 파괴 전까지 부착 응력을 유지하는데 일조했다.

3.4 손상 상태

N-C와 H-C 기둥 실험체의 손상 상태(damage state)를 평가하기 위하여 각각 4가지 손상 상태로 고려되었다. 손상 상태는 DS1, DS2, DS3, 그리고 DS4로 구분되었으며 [21-23], 아래와 같이 정의하였다:

- DS1 : 첫 균열 발생으로 인한 손상 상태
- DS2 : 종방향 철근이 항복하여 발생한 손상 상태

항복 시 강도(V_y)는 ASCE 41 [24]의 7.4.3.2.4절을 따라 계산했으며, 두 실험체의 V_y 를 Fig. 9에 나타냈다.

- DS3 : 강도 저하 발생 시 손상 상태
- DS4 : 최대 전단 강도 후 20% 저감 시 손상 상태

Fig. 10은 실험체 N-C와 H-C의 단계별 손상 상태가 야기된 시점의 변위비를 보여준다.

DS1만 두 실험체가 동일한 변위비를 보였으며, 나머지 손상 상태에 대

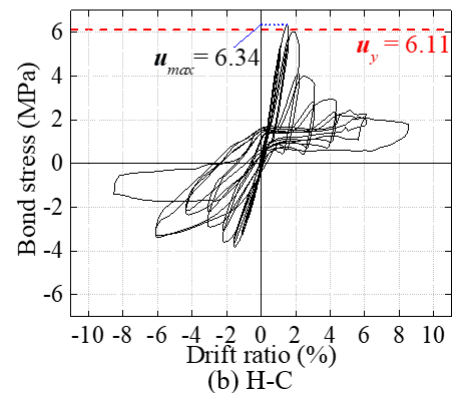
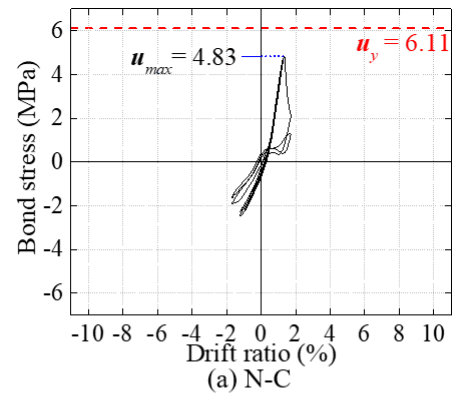


Fig. 8. Bond stress of longitudinal reinforcement

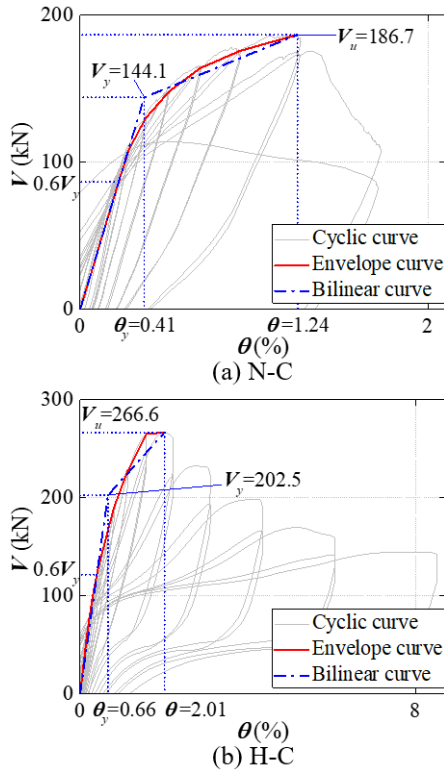


Fig. 9. Yield points of the specimens

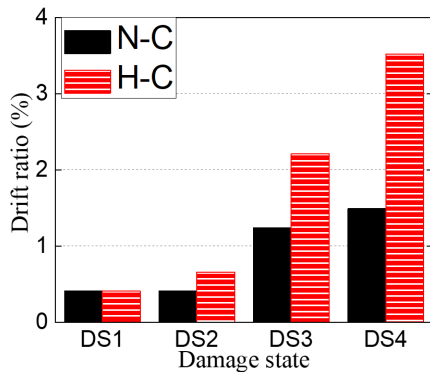


Fig. 10. Damage states of the specimens

한 변위비는 손상이 증가함에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. N-C의 DS4 변위비는 1.49%로 3.52%에 DS4를 경험한 H-C와 2.4배라는 큰 차이가 나타났다. 이는 HPRFCC 사용이 기둥의 손상 상태 발현 지연에 기여하는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구는 짧은 겹침 이음을 갖는 RC 기둥과 짧은 겹침 이음부에 HPRFCC를 보강한 RC 기둥에 일방향 반복하중을 가하여 이력 거동을 평가 및 비교하였다. 실험에 기반하여 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1) N-C 기둥 실험체는 변위비 1.58%에서 콘크리트 피복 탈락이 발생하였

고, 겹침 이음 파괴가 발생하여 이음부에 수직 균열 및 하부 들림 현상이 나타났다. 반면에 H-C 실험체는 HPRFCC의 PVA 섬유 영향으로 실험 종료시점까지 피복 탈락이라는 심각한 손상이 발생하지 않았으며, 3.1% 변위비에서 수직 균열이 발생하였다. HPRFCC를 보강한 기둥 실험체 또한 미끄러짐 파괴가 발생하였지만 기존 RC 기둥에 비해 파괴 시점이 5.4 배가량 지연되었다.

- 2) H-C는 N-C보다 최대 내력이 43% 높게 발휘되었으며, 80% 이상의 변형을 보였다. HPRFCC 사용이 짧은 겹침 이음으로 배근된 기둥의 이력 거동을 크게 향상시켰다.
- 3) 동일한 변위비에서 강도 유지 능력이 H-C 실험체가 N-C 실험체 보다 월등히 뛰어났으며, 최종 에너지 소산량 또한 확연한 차이를 보였다. 이는 HPRFCC 사용으로 내진성능을 향상시킬 수 있음을 의미한다.
- 4) HPRFCC를 보강한 기둥의 겹침 이음부 종방향 철근의 변형률과 부착강도는 항복 변형률 및 항복 강도를 초과했지만 기존 RC 기둥의 주철근은 이전에 겹침 이음 파괴가 발생하여 도달하지 못했다. 비록 H-C 기둥도 부착-미끄러짐으로 인해 파괴는 되었지만 HPRFCC의 영향으로 N-C 기둥과 달리 지속적이고 향상된 부착 강도를 발현했다.
- 5) 본 연구에서는 1 HPRFCC를 적용하여 기둥을 만들어 실험하였다. 따라서 본 연구의 결론을 철근상세가 부족한 기존 기둥에 적용하려면 주의가 필요하고 추가적인 검증이 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A2B3008937) 연구의 일환으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Sezen H, Chowdhury T. Hysteretic model for reinforced concrete columns including the effect of shear and axial load failure. *Journal of Structural Engineering*. 2009 Jan;135(2):139-146.
2. Galanis PH, Moehle JP. Development of collapse indicators for risk assessment of older-type reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*. 2015 Nov;31(4):1991-2006.
3. Lynn AC, Mehle JP, Mahin SA, Holmes WT. Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns. *Earthquake Spectra*. 1996 Nov;12(4):715-739.
4. Sezen H, Moehle JP. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. *Journal of structural engineering*. 2004;130(11):1692-1703.
5. Cho JY, Pincheira JA. Nonlinear modeling of RC columns with short lap splices. In 13 WCEE:13 Th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings. c2004.
6. Elwood KJ, Moehle JP. Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement. *Earthquake Spectra*. 2005 Feb;21(1):71-89.
7. Parra-Montesinos GJ, Peterfreund SW, Shih-Ho C. Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance

- fiber-reinforced cement composites, *ACI Structural Journal*, 2005; 102(3):487.
8. Kim K, Parra-Montesinos G. Behavior of HPFRCC low-rise walls subjected to displacement reversals, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)*, 2003 Apr;505-515.
 9. Han SW, Kang JW, Lee CS. Seismic behavior of slender HPFRCC coupling beams with limited transverse bars, *Earthquake Spectra*, 2018 Feb;34(1):77-98.
 10. Han SW, Kang JW, Jee HW, Shin MS. Cyclic Behavior of HPFRCC Coupling Beams with Bundled Diagonal Bars, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018 May;12(1):1-15.
 11. Han SW, Lee SH. Cyclic behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composite corner joints, *Journal of Building Engineering*, 2022 Apr;47:103892.
 12. Parra-Montesinos GJ. High-performance fiber-reinforced cement composites:an alternative for seismic design of structures, *ACI Structural Journal*, 2005;102(5):668.
 13. ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-19, c2019.
 14. Korea Standards Association, KS F 2403, Standard Test Methods for Making and Curing Concrete Specimens, Republic of Korea, c2014.
 15. Korea Standards Association, KS F 2405, Standard Test Methods for Compressive Strength of Concrete, Republic of Korea, c2017.
 16. Fischer G, Li VC. Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions, *Structural Journal*, 2003;100(1):25-35.
 17. Zhou J, Pan J, Leung CK. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015 Jan 01;27(1):04014111.
 18. Korea Standards Association, KS B 0802, Method of Tensile Test for Metallic Materials, Republic of Korea, c2018.
 19. FEMA, Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components, FEMA 461, c2007.
 20. Quang KM, Dang VP, Han SW, Shin M, Lee K. Behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite columns subjected to horizontal biaxial and axial loads, *Construction and Building Materials*, 2016 Mar;106:89-101.
 21. Goksu C. Fragility functions for reinforced concrete columns incorporating recycled aggregates, *Engineering Structures*, 2021 Apr; 233:111908.
 22. Han SW, Koh H, Lee CS. Fragility functions of different groups of diagonally reinforced concrete coupling beams (DRCBs), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020 Aug;18(1):165-187.
 23. FEMA, Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1-Methodology, Federal emergency management agency, FEMA P-58-1, c2018.
 24. ASCE 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Reston, VA:American Society of Civil Engineers, c2017.