변형경화형 시멘트 복합체의 인장성능에 따른 끼움벽의 내진성능

차준호¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Influence of Strain-Hardening Cement Composite's Tensile Properties on the Seismic Performance of Infill Walls

Jun-Ho Cha¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper describes experimental results on the seismic performance of SHCC (strain-hardening cement composite) infill wall for improving damage tolerance capacity of non-ductile frame. To investigate the effect of tensile strain capacity and cracking behavior of SHCC materials on the shear behavior of SHCC infill wall, three infill walls were fabricated and tested under cyclic loading. The test parameter in this study is a type of cement composites; concrete and SHCCs. The two types of SHCC materials were prepared for infill walls. In order to induce crack damages into the mid-span of the infill wall, each infill wall had two 100-mm-deep-notches on both sides. Test results indicated that SHCC infill walls showed superior crack control capacities and much larger drift ratios at the peak loads than RC (reinforced concrete) infill wall, as expected. In particular, due to the bridging actions of the reinforcing fibers, SHCC matrix used in this study would delay the stiffness degradation of infill wall after the first inclined cracking. Moreover, from the damage classes based on the cracks' maximum width in the infill walls, it was observed that PIW-SHD specimen possessed nearly threefold seismic capacities compared to PIW-SLD specimen. Also, from the results on the strain of diagonal reinforcements, it can be concluded that the SHCC matrix would resist a part of tensile stresses transferred along steel rebar in the infill wall.

Keywords : seismic performance, strain-hardening cement composites (SHCC), infill walls, damage tolerance capacity, ductility

1. 서 론

끼움벽 공법은 비내진상세를 갖는 철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 골조의 내진보강에 널리 사용¹⁻³⁾되는데 이는 다른 공법에 비해 횡강성 및 강도 증진에 탁월한 효과를 보이기 때문이다. 이와 같은 끼움벽 보강공법은 크게 조적, 현장타설(cast-in-place, CIP)의 형태로 적용되어 왔으나, 최근 시공성 및 품질관리 향상을 목적으로 한 프리캐스트 끼움벽에 관한 연구가 일부 진행 중이다.⁴⁾ 끼움벽 보강 골조에 관한 연구 결과⁵⁻⁷⁾에 따르면, 횡강성 및 강도가 크게 향상되나, 횡변형 능력은 크게 감소하며, 기존 골조에 대한 끼움벽의 전단강도 비에 따라 끼움벽의 파괴(조적벽)⁵⁾ 또는 골조 상부의 전단파괴(CIP)^{6,7)}가 발생되는 것으로 나타났다. 특히 끼움벽 보강 시 횡하중에 의한 골조 상부의 전단파괴 발생^{6,7)}은 보강재가 아닌 구조물 자체의 손상을 의미하므로, 내진보강의 기본적인 목

적을 충족시키지 못한다고 할 수 있다. 끼움벽에 의한 내진보강 시 기존 비내진상세 골조의 성능을 개선하고 동시에, 기존 골조의 기동에 발생하는 국부적 전단파괴를 억제하기 위한 끼움벽의 보강방법에 대한 연구⁸⁻¹⁰⁾가 진행되고 있다. 사용된 프리캐스트 끼움벽은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 양단 중앙부에 노치(notch)를 둠으로써 기존 장방형 끼움벽에 비해 강도 및 강성은 다소 저하되나, 손상발생 부위를 중앙부로 유도함으로써 주변 골조의 변형을 단부에서 중앙부로 전이시키는 역할을 하게 된다. 이때, 균열 및 전단응력이 중앙부로 집중됨으로써 발생할 수 있는 취성파괴 및 변형능력 감소를 방지하고자 시멘트 체적비 0.75%의 섬유혼입률을 갖는 변형경화형 시멘트 복합체(strain-hardening cement composites, SHCC)를 끼움벽에 적용하였다. 연구 결과,⁸⁻¹⁰⁾ SHCC가 적용된 끼움벽은 노치가 있더라도 벽체 전반에 걸쳐 미세균열이 고르게 분포하였으며, 노치가 없는 끼움벽과 대등한 강도 및 변형능력을 보였다. 그러나 하단 접합부와 노치를 가로지르는 균열 또는 하단접합부의 보강근 경계를 따라 발생한 균열에 의해 최종 파괴되었다.

따라서 이 연구에서는 기존 연구의 문제점을 보완 및

*Corresponding author E-mail: wiseroad@cnu.ac.kr

Received June 1, 2011, Revised November 5, 2011,

Accepted December 2, 2011

©2012 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 Set of notch for inducing damage

개선함으로써 끼움벽의 거동 특성을 보다 객관적이고 정량적으로 평가하고자 하였으며, 이를 위해 SHCC에 혼입되는 섬유량, 노치의 규격, 배근상세를 개선하였다. 또한 손상유도형 SHCC 끼움벽의 균열 진전 및 거동 특성에 관한 평가뿐만 아니라 JBDPA(The Japan Building Disaster Prevention Association)¹¹⁾에서 제시하고 있는 손상수준 및 내진성능감소계수와 비교·분석함으로써 비내진상세 골조에서 SHCC 끼움벽 보강 시 필요한 설계식 및 해석기법에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

Fig. 2는 끼움벽 실험체의 배근 상세를 나타낸 것이며, Table 1은 실험체 일람을 나타낸 것이다. 이 연구에서는 기준 실험체인 철근콘크리트 끼움벽 PIW-CD 실험체 1개와 SHCC 끼움벽 2개(PIW-SLD 및 PIW-SHD) 등 총 3개의 실험체를 제작하였다.

선행연구에서 나타난 끼움벽 접합부에서의 파괴를 방지하기 위해 연성 특성을 고려하여 수직 및 수평 철근비를 조정하고 대각 보강근을 배근하였으며, 과도한 노치 깊이(250 mm)에 따른 벽판의 내력 저하 및 국부적 균열발생을 방지하고자 노치 깊이를 100 mm로 축소하여 적용하였다.

이때 섬유혼입조건에 따른 끼움벽의 내진성능을 정량적으로 평가하기 위하여 기존연구 결과¹²⁻¹⁴⁾를 토대로 PVA(polyvinyl alcohol) 및 PE(poly ethylene) 섬유를 하이브리드 함으로써 보다 효과적인 균열제어 및 인장성능을 발현하도록 하였다. 또한 이 연구에서는 끼움벽에 관한 선행연구⁸⁻¹⁰⁾에서 활용한 섬유 체적비의 2배에 해당하는 1.5%를 혼입함으로써 섬유혼입조건이 SHCC의 내진성능 및 균열발생 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

Fig. 2 Reinforcement details of infill wall specimens (unit : mm)

2.2 사용 재료

이 연구에서 사용된 시멘트 복합체는 PVA 섬유 1.3%와 PE 섬유 0.2%를 혼입한 SL 및 PVA 섬유 0.75%와 PE 섬유 0.75%를 혼입한 SH로 두 종류가 제조되었으며, Table 2는 시멘트 복합체의 배합조건을 나타낸 것이다. 모든 시멘트 복합체의 물결합재비(W/B)는 0.45로 동일하게 적용하였으며, SHCC에 혼합된 PVA 및 PE 섬유는 각각 일본 K사의 REC-15 및 D사의 DYN-A로 서론에서 기술한 바와 같이 기존 연구와의 연계성을 고려하여 동일한 종류를 사용하였다. 사용된 D6 철근의 강도 특성은 Table 3과 같다.

2.3 시멘트 복합체의 역학적 특성

이 연구에 사용된 시멘트 복합체의 역학적 특성을 평가하기 위하여 압축, 휨 및 직접인장강도 실험을 실시하였다. 압축강도 실험은 KS F 2403에 따라 공시체 제작 후 KS F 2405에 준하여 실시하였다. 휨강도 실험은 200 kN 용량의 UTM을 이용하여 KS F 2408에 준하여 변위 제어 방식으로 4점 가력하였다. 직접인장강도 실험의 경우 SHCC에 관한 직접인장강도 측정 방법을 KS 표준에서 명시하고 있지 않아 덤벨형(dumbbell-shape) 인장실험체를 제작하여 JSCE-E-531¹²⁾의 직접인장시험방법에 준하여 실시하였다.

Fig. 3은 SHCC의 역학적 특성을 나타낸 것이다. 모든

Table 1 Summaries of specimen

Specimen	$f_{ck}^{(1)}$ (MPa)	Type of cement composite	$l_w \times h_w \times t_w$ (mm)	Reinforcing method	Notch (width-depth)	Rebar	$\rho_v^{(2)}$ (%)	ρ_h (%)
PIW-CD ⁽³⁾	45	Concrete	1,400×800×70	Diagonal		D6	0.45	0.61
PIW-SLD		SL						
PIW-SHD		SH						

⁽¹⁾ f_{ck} : specified compressive strength of cement composites

⁽²⁾ ρ_v : vertical reinforcement ratio, ρ_h : horizontal reinforcement ratio

⁽³⁾ PIW : Precast Infill Wall, C/S : Concrete/SHCC, L/H : SHCC with low/high strain capacity in tension, D : Diagonal reinforcement

Table 2 Mix proportions of cement-based composite types

Cement-based composite type	W/B (%)	Fiber volume fraction V_f (%)			Unit weight (kg/m^3)								
		Total	PVA	PE	C	W	FA	G	S	PVA	PE	MC ⁽¹⁾	SP ⁽²⁾
Concrete	0.45	-	-	-	352	176	39	915	789	-		-	-
SL		1.5	1.30	0.20	700	315	-	-	892	16.90	1.94	0.52	0.60
SH			0.75	0.75						9.75	7.26		

⁽¹⁾MC : methyl cellulose, ⁽²⁾SP : superplasticizer

Table 3 Mechanical properties of rebar

Rebar	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	Poisson's ratio	Elongation (%)
D6	291.19	0.15	375.01	0.28	13.1

Fig. 3 Mechanical behaviors of cement-based materials

Fig. 4 Crack pattern after direct tensile tests

시멘트 복합체의 압축강도는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 46.9~48.6 MPa의 범위로 유사하게 나타났으나, SHCC의 탄성계수는 굽은골재의 부재로 인해 콘크리트에 비해 약 30% 낮게 나타났다. SL 및 SH의 휨강도는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 각각 20 및 21 MPa로 보통 콘크리트에 비해 약 60% 높게 나타났으며, 처짐량은 1.75 및 1.85 mm로 유사하게 나타났다. 직접인장강도의 경우 SHCC가 콘크리트에 비해 약 2.5배 높게 나타났으며, SHCC의 최대응력 시 변형률은 0.2% 이전에 나타났으나, 이후 변형률 약 0.6%까지 균열분산 특성으로 인한 변형경화 성능이 발현되었다.

변형연화 구간에서의 인장응력 감소는 SH가 SL에 비해 낮게 나타났으며, 이는 상대적으로 높은 인장강도 및 탄성계수를 갖는 PE 섬유의 혼입량 증가에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 변형경화 및 변형연화구간에서

Fig. 5 Setup of test specimen

의 거동특성은 균열분산 특성에서 비롯된 것이며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

2.4 실험 방법

Fig. 5는 실험체의 설치상황을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 가력형강은 4점 회전단을 가지는 장 방향으로, 횡하중 작용 시 순수 전단만이 발생할 수 있도록 특수제작하였으며, 끼움벽에 미리 매립된 골조 접합용 고력볼트와 가력형강을 체결하여 일체화 하였다. 또한, 벽체의 횡지지효과 및 축하중에 의한 면외 좌굴이 발생하지 않도록 볼지그(ball jig)를 가력형강에 총 4개소 설치하였다.

횡하중은 반력벽에 설치된 1,000 kN 용량의 액추에이터(actuator)로 가력하였으며, 제어는 층간변위의 배율로 점증되는 변위제어방식을 사용하였다. 또한 동일 층간변위에서의 반복가력에 따른 강도저하를 평가하고자 각 층간변위별 2회 가력을 실시하였다. 또한 실험체의 외부면에 각 실험체의 층간 및 전단변형각을 측정하기 위하여 총 5개의 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 실험체 내부의 응력분포, 철근의 변형률 및 실험체의 항복상태를 파악하기 위하여 각 보강근의 필요 위치에 철근 변형률 게이지(wire strain gauge)를 부착하였다.

3. 실험 결과

3.1 균열 진전 및 파괴 양상

Fig. 6은 각 실험체의 초기 경사균열 발생, 철근 항복, 최대하중 시의 균열 양상을 나타낸 것이다.

초기 경사균열 발생 시점에서의 균열 양상을 비교한 결과, 철근콘크리트 기준 실험체인 PIW-CD 실험체는 층간변위 0.06%에서 벽체 접합부의 계면 및 하단부에 초기 휨균열이 발생하였으며, Fig. 6(a-1)에 나타난 바와 같

이 정가력 시 실험체의 상부 접합부에서부터 하단부를 잇는 다소 큰 폭의 경사균열이 발생하였다. PIW-SLD 실험체의 경우는 층간 변위 0.05%에서 벽체의 상·하부 접합부에서 초기 휨균열이 발생하였으며, Fig. 6(b-1)에 나타난 바와 같이 층간변위 0.99%에 이르러 벽체의 중앙부에 경사균열이 발생하였다. PIW-CD 실험체와 달리 주로 미세한 균열이 실험체 전반에 걸쳐 고르게 발생되었다. PIW-SHD 실험체의 경우는 층간변위 0.06%에서 벽체의 기초부 접합부분 및 하단부에 초기 휨균열이 상당부분 발생하였으며, Fig. 6(c-1)에 나타난 바와 같이 층간변위 -0.24%에서 벽체의 상·하부와 중앙부를 잇는 경사균열이 고르게 분포하였다.

철근 항복 시점에서의 균열양상을 비교한 결과, PIW-CD 실험체는 층간변위 0.30%에서 초기 휨균열이 기 발생되었던 벽체 접합부의 계면 및 하단부 균열의 폭이 증가되었으며, Fig. 6(a-2)에 나타난 바와 같이 벽체 중앙부에 정방향 가력 시에 경사균열이 300~400 mm의 길이로 발생되었다. PIW-SLD 실험체의 경우 층간변위 0.21%에서 기 발생되었던 벽체의 상·하부와 중앙부를 잇는 경사균열이 균열폭의 증가 없이 인접 매트릭스로 균열을 분산시켜 Fig. 6(b-2)에 나타난 바와 같이 실험체 전반에

Fig. 6 Crack patterns of infill wall specimens

걸쳐 균열 길이가 400mm 이상 되는 균열이 폭넓게 분포되는 양상을 나타냈다. PIW-SHD 실험체의 경우는 층간변위 0.22%에서 초기 벽체의 기초부 접합부분 및 하단부에 균열이 다수 발생하였으며, Fig. 6(c-2)에 나타난 바와 같이 균열폭의 증가 없이 점차 실험체 상부로 새로운 균열을 발생시켰다.

최대 하중 시점에서의 균열 양상을 비교한 결과, PIW-CD 실험체는 층간변위 0.68%에서 벽체 중앙부에 발생된 정방향 가력 시 경사균열의 균열폭 및 균열 길이가 급격하게 진전됨에 따라 파괴균열이 발생되었으며, 이후 Fig. 6(a-3)에 나타난 바와 같이 벽체 하부의 접합부 계면을 따라 횡방향 균열이 급속히 진전되면서 경계부의 콘크리트가 박락되었다. PIW-SLD 실험체의 경우는 층간변위 1.01%에서 벽체 우측 하부의 접합부 계면을 따라 발생한 횡방향 균열 및 벽체 중앙부의 정방향 가력 시 경사균열이 명확히 나타났으며, 이후 균열폭이 증가함에 따라 Fig. 6(b-3)에 나타난 바와 같이 최종파괴 되었으나, 급격한 내력저하는 발생하지 않았다. PIW-SHD 실험체의 경우는 층간변위 0.81%에서 벽체 중앙부의 미세한 경사균열이 실험체 전반에 걸쳐 폭넓게 전이되었으며, Fig. 6(c-3)에 나타난 바와 같이 벽체의 좌측 하부의 횡방향 균열의 폭이 증가함에 따라 최종파괴 되었다.

각 실험체의 균열 진전 및 파괴 양상에 대한 결과를 종합적으로 비교·분석한 결과, 기 발생된 경사 및 횡방향 균열의 폭이 급격하게 증가함에 따라 최종파괴에 이르는 PIW-CD 실험체와 다르게 SHCC를 사용한 끼움벽의 경우 벽판 전체에 걸쳐 미세균열이 폭넓게 분포하는 특성을 나타내어 내진보강 공법에 적용 시 우수한 내진성능 및 내구성능을 발현할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이와 같은 SHCC 끼움벽의 균열 발생 및 진전 특성은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 직접인장하에서의 SL 및 SH 균열 특성과 유사하게 나타났다. 따라서 SHCC의 직접인장 실험 결과를 근거로 SHCC 끼움벽의 균열분산 특성을 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 배근상세 개선으로 인해 최종파괴 시 발생된 벽체 하부의 횡방향 균열은 기존 연구에 비해 완화되었다. 다만, 기존 연구에서의 손상집중현상을 완화하기 위해 축소시킨 노치길이는 오히려 노치의 유무에 따른 균열분산

및 진전특성에 영향을 미치지 않았다. 따라서 손상을 유도하면서도 국부적 균열 발생을 방지할 수 있는 적절한 노치길이 설계에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3.2 하중-변위 관계 곡선

SHCC 끼움벽의 전단성능에 관한 실험 결과를 정리하여 Table 4에 나타내었으며, 하중 증가에 따른 초기 경사균열 발생, 실험체의 항복, 각부 철근 항복, 최대 하중 시점의 변위 및 전단변형률을 중심으로 분석하였다.

Fig. 7은 각 실험체의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 초기 경사균열 발생 시점의 경우, PIW-CD 실험체는 정가력 시 하중 124.9 kN, 변위 0.51 mm에서 발생하였으며, 부가력 시와 비교한 결과 하중값은 유사하게 나타났으나, 약 4배의 변위 차이를 보였다. PIW-SLD 실험체는 부가력 시 하중 193.9 kN, 변위 0.99 mm에서 발생하였으며, 이를 PIW-CD 실험체와 비교한 결과 하중 및 변위가 약 30~60% 및 2배 정도 높은 범위에서 발생한 것으로 나타났다. PIW-SHD 실험체는 하중 -171.0 kN, 변위 -1.90 mm에서 발생하였고 PIW-SLD 실험체와 거의 유사한 양상을 나타냈으며, 부가력 시 유사한 하중값에도 불구하고 약 3배에 해당하는 변위 증가를 나타내어 초기 균열 억제 측면에서 우수한 성능을 나타냈다.

항복 시점의 경우, PIW-CD 실험체는 정가력 시 하중 228.8 kN, 변위 2.42 mm에서 발생하였고 초기 경사균열 발생 시 부방향 가력에서 발생된 비교적 큰 폭의 균열에 기인하여 항복 시점의 경우에도 부방향 가력에서 약 4배 정도 높은 변위를 나타내었다. PIW-SLD 실험체는 정가력 시 하중 271.5 kN, 변위 1.66 mm에서 발생하였으며, 부방향 가력에서도 유사한 거동을 보이는 등 PIW-CD 실험체와 비교 시 약 25%의 하중, 2배의 변위 증가를 보였다. PIW-SHD 실험체는 하중 259.6 kN, 변위 1.75 mm에서 발생하였으며, PIW-SLD 실험체와 유사한 거동 특성을 나타냈다.

최대 하중 시점의 경우, PIW-CD 실험체는 정가력 시 하중 394.4 kN, 변위 5.40 mm에서 발생하였으며, 부방향 가력 시에서는 변위 -7.17 mm까지 증가하면서 최종파괴 되었다. PIW-SLD 실험체는 정가력 시 하중 428.7 kN, 변

Table 4 Characteristics of strength and drift ratio for specimens

Specimen	Initial shear crack						Yielding of steel						Maximum strength					
	Positive			Negative			Positive			Negative			Positive			Negative		
	$V_i^{(1)}$ (kN)	$\delta_i^{(2)}$ (mm)	Drift ⁽³⁾ (%)	V_i (kN)	δ_i (mm)	Drift (%)	V_y (kN)	δ_y (mm)	Drift (%)	V_y (kN)	δ_y (mm)	Drift (%)	V_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	Drift (%)	V_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	Drift (%)
PIW-CD	124.9	0.51	0.06	-141.7	-2.01	-0.25	228.8	2.42	0.30	-210.6	-3.21	-0.40	394.4	5.40	0.68	-319.5	-7.17	-0.90
PIW-SLD	193.9	0.99	0.12	-180.7	-0.68	-0.09	271.5	1.66	0.21	-262.9	-1.50	-0.19	428.7	8.07	1.01	-587.5	-6.14	-0.77
PIW-SHD	189.0	1.02	0.13	-171.0	-1.90	-0.24	259.6	1.75	0.22	-281.8	-2.42	-0.30	638.3	6.41	0.80	-567.8	-5.20	-0.65

⁽¹⁾ V_i : shear strength at the Initial shear crack, V_y : shear strength at the Yielding of steel, V_{max} : max. shear strength

⁽²⁾ δ_i : displacement at the Initial shear crack, δ_y : displacement at the Yielding of steel, δ_{max} : displacement at the max. strength

⁽³⁾Drift ratio (%) : Relative side sway of top from the bottom of specimen ($\delta/800$ mm)

Fig. 7 Load versus displacement relationships

위 8.07 mm에서 발생하였으며, PIW-SHD 실험체는 하중 638.3 kN, 변위 6.41 mm에서 발생하였다. 한편, 모든 SHCC 실험체의 하중-변위값이 가력 방향에 따라 다소 비대칭적인 거동을 나타내는데 이는 최종파괴를 지배하는 균열 발생 위치의 영향 및 기존 연구 결과^{8,9)}와 같이 벽판 타설 시 SHCC 내 보강섬유의 분산/배열 방향에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7(d)는 각 실험체에 작용한 전단응력을 각 시멘트 복합체의 압축강도로 나누어 무차원화된 전단응력-층간 변위 관계 곡선을 나타낸 것이다. 정가력 시 PIW-CD 실험체의 최대전단응력은 0.69, SHCC 끼움벽인 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체는 각각 0.74 및 1.09를 보여 PIW-CD 실험체에 비해 각각 7% 및 58% 높은 것으로 나타났다. 그러나 무차원화하기 이전인 각 실험체의 최대하중 간 차이보다 다소 낮은 것으로 나타나 SHCC 끼움벽에 적용 시 압축강도에 의한 영향은 적은 것으로 판단된다. 그러나 SHCC 끼움벽의 전단거동은 시멘트 복합체

Fig. 8 Comparison of crack width

의 직접인장강도에 따라 다소 차이를 보였다.

Fig. 9 Total number of cracks

4. 실험 결과의 분석

4.1 균열 거동 특성

Figs. 8 및 9는 각 실험체의 균열폭 및 균열개수의 진전 양상을 나타낸 것이다. 이 실험에서는 매회 2사이클 반복 가력 및 실험 시 불규칙한 변수에 의한 균열 요소를 제한하고 보다 객관적인 전단균열 진전양상을 평가하기 위하여 Fig. 9에 나타난 바와 같이 압축 스트럿 영역 내부에 발생한 균열만을 산정하였다.

Fig. 8의 균열폭 진전 양상의 경우 ACI 224 기준에서 규정된 0.4 mm를 초과하는 구조균열이 발생하는 시점에서의 층간변위를 기준으로 비교하였다. PIW-CD 실험체의 경우 층간변위 0.2% 이후부터 구조균열이 발생하여 약 최대하중 시 층간변위인 0.7%까지 급격한 균열폭의 증가를 나타냈다. PIW-SLD 실험체의 경우 층간변위 0.6% 이후부터 구조균열이 발생하여 PIW-CD 실험체에 비해 3배 정도 우수한 균열제어성능을 나타냈으나, 앞서 균열

진전 양상에서 전술한 바와 같이 구조균열 발생 이후 벽체 우측 하부의 접합부계면을 따라 발생한 횡방향 균열의 균열폭이 증가하면서 최종 파괴되는 양상을 나타냈다. PIW-SHD 실험체의 경우 층간변위 0.9% 이후부터 구조균열이 발생하였으며, 최종파괴 시 까지 급격한 균열폭의 증가 없이 안정적인 거동을 보였다.

또한 철근의 항복 및 최대 하중 시점에서의 균열폭을 비교한 결과 PIW-CD 실험체는 철근의 항복 이전에 이미 구조균열이 발생한 반면, SHCC 끼움벽의 경우는 두 실험체 모두 철근 항복 이후에도 우수한 균열제어성능을 나타냈으며, 섬유 혼입조건에 따라서는 PVA 섬유의 혼입률이 높은 PIW-SHD 실험체가 PIW-SLD 실험체에 비하여 우수한 성능을 나타내면서 전 벽면에 걸쳐 원활한 응력분포를 나타냈다.

Fig. 9는 각 실험체의 층간변위 증가에 따른 균열개수 진전 양상을 나타낸 것으로 PIW-CD 실험체의 철근 항복 시 균열개수가 15개인데 반해 SHCC 끼움벽의 균열개수는 각각 30개 정도로 2배의 증가를 보였다. 또한 철근 항복 이후 최대 하중 시까지의 균열개수 증가 양상을 비교한 결과 PIW-CD 실험체는 약 30%의 증가를 보여 균열개수의 증가 없이 기 발생된 균열의 균열폭이 급격하게 증가하면서 최종 파괴되는 양상을 보였다. 그러나 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 경우 PIW-CD 실험체에 비해 약 3~3.5배의 균열개수 증가를 보였으며, 기 발생된 균열이 인접 매트릭스 전체로 폭넓게 전이되면서 미세한 균열이 확산되었다.

4.2 강성 저하 특성

Fig. 10(a) 및 (b)는 사이클 진전 및 반복가력에 따른 각 실험체의 강성 저하 특성을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 각 실험체의 초기 강성을 기준으로 무차원화시켜 나타냈으며, Fig. 10(b)는 반복가력에 따른 상대적인 강성

(a) Cyclic stiffness degradation

(b) Stiffness degradation by cycle repetition

Fig. 10 Stiffness degradation characteristics of specimens

저하 양상을 나타낸 것으로 정방향 가력을 기준으로 2회 가력 시의 강성을 1회 가력 시의 강성으로 나누어 계산하였다.

Fig. 10(a)에 나타난 바와 같이 강성 저하율은 PIW-CD, PIW-SHD, PIW-SLD 실험체의 순서로 높게 나타났으며, SHCC 끼움벽에 비해 초기 비교적 큰 폭의 균열이 발생한 PIW-CD 실험체가 큰 강성 저하를 나타냈다. 특히 초기 균열 이후 철근 항복 시점까지 PIW-CD, PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 강성 저하율은 각각 61%, 34% 및 42%로 나타났다. 이는 초기 균열 발생 이후 해당 균열에 응력이 집중되어 전체적으로 내력이 저하된 PIW-CD 실험체에 비해 균열 분산 등의 안정적인 거동을 보이는 SHCC의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 또한 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 강성 저하 특성을 비교한 결과 PIW-SLD 실험체가 다소 완만한 강성 저하 양상을 나타내는데, 이는 유사한 하중 증가율에도 불구하고 PIW-SHD 실험체의 변위 증가율이 높게 나타났기 때문으로 판단된다.

Fig. 10(b)는 반복가력에 따른 강성 저하 특성을 나타낸 것으로 Fig. 10(a)의 결과와 마찬가지로 반복가력에서도 초기 비교적 큰 폭의 균열이 발생된 PIW-CD 실험체가 높은 강성 저하율을 나타냈다. 또한 철근 항복 이후 강성 저하율을 비교한 결과 PIW-CD 실험체의 경우 골조와의 접합부 계면에 발생한 횡방향 균열이 큰 폭으로 증가하여 강성이 저하되는 양상을 나타냈다. PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체는 균열분산 특성 및 철근의 인장응력 부담으로 인해 평균적으로 0.8~0.9의 강성비를 유지하였다. PIW-SHD 실험체의 경우 항복 이후 PIW-SLD 실험체에 비해 우수한 강성 특성을 나타내는데, 이는 초기 강성이 PIW-SLD 실험체에 비해 상대적으로 낮게 나타났기 때문으로 판단된다.

4.3 에너지소산 특성

Fig. 11은 각 실험체의 에너지소산능력을 비교하여 나

타낸 것이며, Fig. 11(a)는 각 사이클의 전체 면적을 적분하여 누적 합산한 누적에너지소산면적을 나타낸 것이다. PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체는 17.0 및 15.2 kN/m, PIW-CD 실험체는 7.2 kN/m로 SHCC 끼움벽이 각각 2.4 및 2.1배 높은 누적에너지소산능력을 나타냈다.

PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체와 PIW-CD 실험체의 누적에너지소산능력을 비교한 결과 PIW-CD 실험체의 경우 최대 하중 시점까지 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체와 유사한 누적에너지소산능력을 나타냈으나, 이후 최종 파괴 되면서 에너지소산능력의 증진 양상은 나타나지 않았다. 반면, 앞서 균열 및 강성 저하 특성에서 설명한 바와 같이 우수한 균열제어 및 변형경화 성능이 발현된 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 경우 최대 하중 이후에도 에너지소산능력의 증진 양상을 나타냈다. PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 누적에너지소산능력을 비교한 결과 비교적 완만한 강성 저하 양상을 나타낸 PIW-SHD 실험체가 PIW-SLD 실험체에 비해 층간변위 0.8%까지 유사하거나 상회하고 있는 것으로 나타났으나, 이후 PIW-SLD 실험체의 하중 및 변위가 점진적으로 증가되면서 결과적으로 PIW-SLD 실험체가 약 13% 높은 누적에너지소산능력을 나타냈다.

Fig. 11(b)는 각 실험체별 에너지 소산지표(energy dissipation index)를 비교하여 나타낸 것으로 이는 해당 시점까지의 누적에너지소산량(E_t)을 항복시점까지의 탄성 에너지 소산량($(V_y \times \delta_y)/2$)으로 무차원화 한 값으로 정의된다.

PIW-CD 및 PIW-SLD, PIW-SHD 실험체의 최대 하중 시 에너지소산지표를 비교한 결과 6.5 및 18.9, 16.8로 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체가 PIW-CD 실험체에 비해 2.9배 및 2.6배 높게 나타났다. 또한 PIW-CD 실험체의 경우 철근 항복 시점인 층간변위 0.3%까지는 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체와 유사한 에너지소산지표를 나타냈으나, 이후 급격한 내력 저하 및 취성적인 균열 분포를 나타냄에 따라 에너지소산지표의 증가율이 감소되는 것으로 나타났다.

Fig. 11 Energy dissipation characteristics of specimens

Table 5 Damage class for structural members¹¹⁾

Damage class	Observed damage on structural members
I	Visible micro crack on the surface (crack width ≤ 0.2 mm)
II	Visible clear cracks on concrete surface (0.2 mm ≤ crack width ≤ 1.0 mm)
III	Remarkable wide cracks. Local crush of concrete cover (1.0 mm ≤ crack width ≤ 2.0 mm)
IV	Remarkable crush of concrete with exposed reinforcement. Spalling of the covering concrete (crack width ≥ 2.0 mm)
V	Buckling of reinforcement, crushing of core concrete and vertical deformation of columns and/or shear walls is found. Slide-sway, subsidence of upper floors, and/or fracture of reinforcement are observed in some cases.

Fig. 12 Mechanism of seismic capacity reduction factor¹¹⁾

PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체를 비교한 결과 PIW-SHD 실험체의 경우 최대 W 하중 시점인 층간변위 0.8% 이후 1.0%까지의 에너지소산지표 증가율은 35%로 PIW-SLD 실험체에 비해 약 12% 낮게 나타났으나, 결과적으로는 큰 차이를 발생하지 않는 것으로 나타났다.

4.4 구조물 손상 지표

Table 5는 기존 연구 결과¹¹⁾를 바탕으로 균열폭의 증가에 따른 구조물 손상 식별 분류표를 나타낸 것이며, Fig. 12는 에너지소산능력을 기준으로 잔존에너지를 평가하여 Table 5의 구조물 손상 식별 분류표와 비교·분석한 내진성능 감소계수(η)의 산정 방법을 나타낸 것이다.

Fig. 13은 4.1절에서 기술한 바와 같이 벽판의 압축스트러트 영역에서 계측된 최대 균열폭에 근거한 내진성능 감소계수(η)변화 양상을 나타낸 것으로 각 실험체 별로 동일한 층간변위에서의 손상 정도를 무차원화하여 나타났다. PIW-CD 실험체의 경우 층간변위 0.1%에서 이미 손상분류 “II” 단계에 진입하였고 층간변위 0.3%에서는 콘크리트의 박락 등의 구조적 불안정 상태를 나타내는 “III” 단계에 진입하였으며, 층간변위 0.5%에서는 최종 단계인 “V” 단계를 나타냈다. PIW-SLD 실험체의 경우 층간변위 0.3%에서 “II” 단계에 진입하였고 층간변위 0.8% 이후 “III” 단계에 진입하여 1.0%까지 손상 단계를 유지하는 우수한 내진성능을 나타냈다. PIW-SHD 실험체의 경우 PIW-SLD 실험체와 마찬가지로 층간변위 0.3%에서

Fig. 13 Seismic capacity reduction factor

“II” 단계에 진입하였으나, 이후 가장 우수한 손상제어성능에 기인하여 층간변위 1.0% 이후에도 손상분류 “II” 단계를 유지하였다. 내진성능 감소계수의 저하 양상을 비교한 결과 PIW-CD 실험체는 최종 파괴 시점인 층간변위 0.5%에서 0.4 이하의 계수값을 나타냈으나, PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 경우는 동일한 층간변위에서 0.7 이상의 계수값을 나타냈다. 결과적으로 최종 파괴 시 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체가 PIW-CD 실험체에 비해 약 2배에 해당하는 층간변위를 나타내 우수한 변형경화성능을 입증하였다. 또한 손상분류 측면에서는 PIW-SHD 실험체가 PIW-SLD 실험체에 비해 약 3배에 해당하는 우수한 내진성능을 나타냈으며, 내진성능 감소계수의 저하 양상에서는 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체가 유사하게 나타났다.

4.5 철근의 변형률

Fig. 14는 수직, 대각 보강근의 위치에 따른 각 실험체의 변형률 진전양상을 나타낸 것이다.

Fig. 14(a)는 끼움벽이 구속되는 볼트 접합부 중 내력이 가장 크게 작용할 것으로 판단되는 단부 수직철근의 변형률을 비교한 것이며, PIW-CD 실험체의 경우가 가장 낮은 하중에서 항복되었다. 이는 아래의 최종 파괴양상에 나타난 바와 같이 균열의 국부적 발생으로 인해 인접 매트릭스 간 균열 전이가 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 균열 간격이 비교적 넓게 분포함으로

Fig. 14 Applied load-strain of reinforcement bar curve

써 변형이 예상되었던 철근의 위치에 하중이 전달되지 못함에 따라 철근의 변형을 증진 양상이 나타나지 않았다. 반면, PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체는 PIW-CD 실험체에 비해 우수한 균열분산 특성에 기인하여 철근에 집중되는 인장응력을 SHCC 시멘트 복합체가 일정 부분 부담하였으며, 이에 따라 높은 변형을 증진에도 불구하고 하중 저하 양상은 나타나지 않았다. PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체를 비교한 결과 전술한 바와 같이 PIW-SLD 실험체에 비해 SHCC 시멘트 복합체의 인장능력이 우수한 것으로 나타났던 PIW-SHD 실험체가 매트릭스 내 원활한 응력 분산으로 인해 수직철근의 변형률이 다소 낮게 나타났다.

Fig. 14(b)는 대각 보강근의 변형을 진전 양상을 나타낸 것으로 대부분의 실험체는 최대 하중 시점에서 항복되는 양상을 나타냈다. 이는 전단 거동 시 내력 향상에 크게 기여하는 대각철근의 특성에 기인한 것으로 판단되며, PIW-CD 실험체의 경우도 마찬가지로 역학적 특성에서 측정된 항복 강도보다 다소 높은 강도 및 변형률을 나타냈다. 또한 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 변형률은 7,000 μ 및 6,000 μ 로 PIW-CD 실험체보다 우수한 변

Fig. 15 ductility ratio of specimens

형을 증진 양상을 나타냈으며, 이는 SHCC 기음벽에 전단 균열 및 파괴 진전 시 매트릭스 내에서 섬유 간 인장응력 발생으로 인하여 균열제어능력이 원활히 발휘되었고, 기 발생한 균열의 손상이 완화되었기 때문으로 판단된다.

4.6 연성비 평가

Fig. 15는 각 실험체의 연성비를 나타낸 것으로 가력 방향에 따라 최대 하중 시점에서의 변위를 철근 항복 시점에서의 변위로 나누어 계산(δ_{max}/δ_y)하였으며, PIW-CD 실험체의 연성 값을 기준으로 하여 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 결과 값을 무차원화하여 나타냈다. 정가력 시의 연성비는 2.2 및 4.9, 3.7로 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체가 PIW-CD 실험체에 비하여 2.2 및 1.6배 높게 나타났다.

가력 방향에 따른 연성비를 비교한 결과, PIW-CD 실험체의 경우는 가력 방향에 관계없이 거의 유사한 결과가 나타났으나, PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체의 경우 전술한 바와 같이 벽판 타설 시 SHCC 내 보강섬유의 배열방향(arrange direction)에 의한 영향에 기인하여 부방향 가력 시의 연성비가 16% 및 35% 낮게 나타났다.

그러나 평균 연성비를 기준으로 평가 시 SHCC 끼움벽이 높은 연성비를 나타내고 있으며, 최대 하중 이후의 거동 특성을 비교했을 경우에도 마찬가지로 중간변위 약 1%까지 연성능력이 확보되는 것으로 나타나 지진 발생 등에 의한 기존 건축물의 내구성 및 내력 저하에 효과적으로 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) 각 실험체의 균열 진전 양상을 비교한 결과 기존 연구에서 발생된 접합부 계면의 횡방향 균열은 다소 완화되는 것으로 나타났으며, 균열 발생 시 급격한 균열폭 증가로 인해 취성 파괴되는 PIW-CD 실험체에 비해 SHCC 실험체는 매트릭스 전반에 미세균열을 폭넓게 분산시키는 우수한 균열제어 성능을 나타냈다.
- 2) 하중-변위 관계 곡선을 비교한 결과 SHCC 실험체가 PIW-CD 실험체에 비하여 우수한 하중-변위 관계를 나타냈으며, 유사한 하중 시 변위는 약 2배 정도 증진되는 것으로 나타났다. 또한 SHCC 실험체의 경우 가력 방향에 따라 다소 비대칭적인 거동을 보이는데, 이는 보강섬유의 배열방향(arrange direction)에 의한 영향으로 판단된다.
- 3) PIW-CD 및 PIW-SLD, PIW-SHD 실험체의 초기 강성 이후 철근 항복 시점까지의 강성 저하율은 48% 및 20%, 30%로 저하되었으며, 에너지소산능력을 비교한 결과 SHCC의 모든 실험체가 PIW-CD 실험체에 비하여 약 2.5배 높은 성능을 나타내, 추후 내진 부재에 적용 시 우수한 내진성능을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
- 4) 균열폭 진전에 따른 내진성능 감소계수(η)저하 양상을 비교한 결과 PIW-CD 및 PIW-SLD, PIW-SHD 실험체의 손상분류 “II” 단계 진입 시 중간변위는 0.06% 및 0.30%, 0.30%로 SHCC의 실험체가

5배 높게 나타났다. 또한 손상분류 측면에서는 PIW-SHD 실험체가 PIW-SLD 실험체에 비해 약 3배에 해당하는 우수한 내진성능을 보였다.

- 5) 각 실험체의 철근 변형률을 비교한 결과 PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체는 PIW-CD 실험체에 비해 우수한 균열분산 특성에 기인하여 철근에 집중되는 인장응력을 SHCC 시멘트 복합체가 일정 부분 부담하였으며, 이에 따라 높은 변형률 증진에도 불구하고 하중 저하 양상을 나타나지 않았다. PIW-SLD 및 PIW-SHD 실험체를 비교한 결과 PIW-SLD 실험체에 비해 PIW-SHD 실험체가 매트릭스 내 원활한 응력 분산으로 인해 수직철근의 변형률이 다소 낮게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2011년 교육과학기술부와 한국연구재단의 중견 연구자 지원사업(20110015271)의 일부이고 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Phan, L. T., Todd, D. R., and Lew, H. S., *Strengthening Methodology for Lightly Reinforced Concrete Frames-I*, NISTIR 5128, National Institute of Standards and Technology, 1993, 108 pp.
2. Phan, L. T., Todd, D. R., and Lew, H. S., *Strengthening Methodology for Lightly Reinforced Concrete Frames-II*, Recommended Calculation Techniques for the Design of Infill Walls, NISTIR 5421, National Institute of Standards and Technology, 1994, 44 pp.
3. Sugano, S., “Guidelines for Seismic Retrofitting (Strengthening, Toughening, and/or Stiffening), Design of Existing Reinforced Concrete Buildings,” *Proceeding of the Second Seminar on Repair and Retrofit of Structures*, Ann Arbor, Michigan, 1981, pp. 189-246.
4. (財)日本建築総合試験所構造部, 鉄筋コンクリート増設壁耐震補強:設計及び施工指針, 2001.
5. Harris, H. G., Ballouz, G. R., and Kopatz, K. W., “Preliminary Studies in Seismic Retrofitting of Lightly Reinforced Concrete Frames Using Masonry Infills,” *Proceeding, 6th North American Masonry Conference*, Masonry Society (US), Philadelphia, 1993, pp. 383-395.
6. Tomazevic, M. and Zarnic, R., “The Behaviour of Horizontally Reinforced Masonry Walls Subjected to Cyclic Lateral in-Plane Reversals,” *Proceeding of the 8th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol.4, 1984, pp. 1-8.
7. 윤현도, 김선우, 이갑원, 최창식, 이혜연, “고인성 시멘트 복합체를 사용한 끼움벽으로 보강된 비내진 상세 철근 콘크리트 골조의 내진성능,” 대한건축학회 논문집(구조계), 22권, 5호, 2006, pp. 31-38.
8. 김선우, 윤현도, 장용현, “내진보강을 위한 손상유도형

- PC 끼움벽의 구조성능,” 대한건축학회 논문집, 25권, 3호, 2009, pp. 43~50.
9. 김선우, 윤현도, 장광수, 윤여진, “변형경화형 시멘트 복합체를 사용한 프리캐스트 끼움벽의 내진성능,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 327~335.
 10. 김선우, 윤현도, 송선화, 윤여진, “보강상세에 따른 프리캐스트 변형경화형 시멘트 복합체 끼움벽의 내진성능,” 구조물진단학회지, 13권, 3호, 2009, pp. 209~216.
 11. The Japan Building Disaster Prevention Association, *Guideline for Post-Earthquake Damage Evaluation and Rehabilitation*, 2001.
 12. Japan Society of Civil Engineers, “Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks,” *Concrete Engineering Series*, Vol. 82, 2008.

요 약 이 논문에서는 비내진상세 골조의 손상완화능력 향상을 위한 연구의 일환으로 변형경화형 시멘트 복합체 끼움벽의 내진성능을 실험적으로 평가하였다. SHCC의 인장변형능력 및 균열거동 특성이 끼움벽의 전단 거동에 미치는 영향을 구명하기위해 총 3개의 끼움벽 실험체를 제작하여 반복하중 하에서 실험을 실시하였다. 이 연구에서 사용된 시멘트 복합체의 종류는 콘크리트와 SHCC로 하였다. SHCC는 인장 특성에 따른 영향을 검토하기위해 PVA1.3%+PE0.2% 및 PVA0.75%+PE0.75%로 두 종류의 배합조건을 갖도록 계획하였다. 끼움벽의 균열손상 발생 부위를 중앙부로 유도하기위해 모든 끼움벽 실험체의 좌·우측면에 100 mm 깊이의 노치를 설치하였다. 실험 결과, SHCC 끼움벽의 경우 철근 콘크리트 끼움벽에 비해 우수한 균열제어성능을 나타냈으며, 최대하중 도달 시점에서의 층간변위 또한 높게 나타났다. 특히, 초기 경사균열 발생 이후에도 SHCC 내의 보강 섬유간 섬유가교작용에 기인하여 완만한 강성 저하 양상을 나타냈다. 게다가 끼움벽의 균열폭을 기준으로 손상 식별 단계를 분석한 결과, PIW-SHD 실험체가 PIW-SLD 실험체에 비해 약 3배에 해당하는 우수한 내진성능을 나타냈다. 또한 대각 보강근의 변형을 진전 양상을 비교한 결과, 우수한 균열분산 특성에 기인하여 철근에 집중되는 인장응력을 SHCC 매트릭스가 일정 부분 부담하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 내진성능, 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC), 끼움벽, 균열손상완화, 연성