



ECC 날개벽 요소로 보강된 비내진상세를 갖는 철근콘크리트 골조의 내진성능

강대현¹⁾ · 옥일석¹⁾ · 윤현도¹⁾ · 김재환²⁾ · 양일승^{3)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾AMS 엔지니어링 ³⁾동신대학교

The Seismic Performance of Non-Ductile Reinforced Concrete (RC) Frames with Engineered Cementitious Composite (ECC) Wing Panel Elements

Dae-Hyun Kang,¹⁾ Il-Seok Ok,¹⁾ Hyun-Do Yun,¹⁾ Jae-Hwan Kim,²⁾ and Il-Seung Yang^{3)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²⁾AMS Engineering, Daejeon 34077, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Dongshin University, Naju 58245, Korea

ABSTRACT This study was conducted to experimentally investigate the seismic retrofitting performance of non-ductile reinforced concrete (RC) frames by introducing engineered cementitious composite (ECC) wing panel elements. Non-ductile RC frame tested in this study were designed and detailed for gravity loads with insufficient or no consideration to lateral loads. Therefore, Non-ductile RC frame were not satisfied on present seismic code requirements. The precast ECC wing panels were used to improve the seismic structural performance of existing non-ductile RC frame. A series of experiments were carried out to evaluate the structural performance of ECC wing panel elements alone a non-ductile RC frame strengthened by adding ECC panel elements. Failure pattern, strength, stiffness and energy dissipation characteristics of specimens were evaluated based on the test results. The test results show that both lateral strength and stiffness were significantly improved in specimen strengthened than non-ductile RC frame. It is noted that ECC wing wall elements application on non-ductile RC frame can be effective alternative on seismic retrofit of non-ductile building.

Keywords : Engineered Cementitious Composite (ECC), wing panel elements, non-ductile RC frame, seismic performance, strength

1. 서 론

1.1 연구의 배경

지진하중을 적정하게 반영하여 설계되지 않은 구조물은 지진 발생 시 구조물 전체가 급격한 붕괴를 초래할 수 있다.¹⁾ 따라서 현행 내진기준에서 요구되는 내진성능을 보유하지 못한 구조물의 지진피해를 완화하기 위하여 기존 구조물의 보유내진성능 평가기법 뿐만 아니라 내진보강기법 개발에 대한 다양한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. Sugano 등²⁾은 일본에서 내진 보강이 실시된 157개 건축물에 적용된 공법을 조사하였으며, 끼움

벽 보강이 130건, 철근콘크리트 기둥 보강이 52건, 날개벽 보강이 43건 등으로 실제 건축물에 내진보강을 위하여 주로 벽체를 신설하여 기존 구조물의 강도 및 강성을 증진하는 방법이 적용되고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한, 국내에서도 한국건설기술연구원에서 지진 피해를 받은 구조물의 보수·보강 해외 사례를 비교·분석하였으며, 국내에서는 지진의 규모가 상대적으로 크지 않으므로 경제적 관점에서 강도 및 강성 증진형 보강공법이 적용 가능성이 높다고 보고되고 있다.³⁾ 특히 2011년 정부에서 실시한 공공시설물의 내진성능 보유실태조사결과⁴⁾에 따르면 2011년 현재 공공시설물의 37.3%만이 소요내진성능을 보유하고 있으며 정부에서는 2030년까지 공공시설물의 80%까지 내진성능을 보유하도록 공공시설물에 대한 내진보강 기본계획을 수립하고 있다. 따라서, 현시점에서 기존 구조물의 다양한 내진보강 공법 중 구조물의 강도 및 강성을 크게 향상시키며 구조물의 기능성에 대한 저해를 최소화할 수 있는 날개벽 등에 의한 내진보강

*Corresponding author E-mail : yang1698@hanmail.net

Received February 6, 2015, Revised June 9, 2015,

Accepted June 22, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

방법 개발은 시급한 연구주제로 판단된다.

1.2 끼움벽 요소에 의한 내진보강 연구 동향

1971년 Ersoy와 Uzsoy⁵⁾에 의해 철근콘크리트 끼움벽이 기존 골조의 강도 및 강성증진에 유효하다는 것이 입증된 이후 끼움벽에 의한 기존 구조물의 보강성능 평가에 관한 다양한 연구가 본격적으로 진행되기 시작하였다. Baran과 Tankut⁶⁾는 프리캐스트 콘크리트 패널(Precast concrete panels)을 고강도 에폭시 모르타르로 접착한 끼움벽에 의해 기존 골조를 보강하는 방식으로 기존 골조의 강도, 강성 및 에너지소산능력을 향상시킬 수 있다고 보고하고 있다. Kaltakci와 Yavuz⁷⁾는 기존 골조에 부분적으로 설치된 끼움벽(Partial RC walls)에 의해 기존 골조의 연성, 강도 및 강성을 선택적으로 증진할 수 있다고 보고하고 있다. 국내에서도 박구연⁸⁾ 등은 비선형유한요소해석 및 압축장이론에 의해 끼움벽으로 보강된 골조의 해석기법을 제안하였고 한민기⁹⁾ 및 이해연¹⁰⁾ 등은 기존 골조에 현장타설된 끼움벽으로 보강된 골조의 내진성능을 비선형유한요소해석기법 및 실험을 통하여 각각 평가하였다. 날개벽 보강방법의 경우 강영웅¹¹⁾ 등에 의해 기둥 외측 및 양측에 붙는 날개벽체의 형상에 따른 연구가 진행되었다. 연구결과 날개벽보강이 비내진상세를 갖는 기둥에 우수한 내진성능을 부여하는 것으로 나타났다. Kabeyasawa¹²⁾ 등에 의하여 기둥의 단면, 날개벽의 길이, 두께 등의 변수로 실험 및 분석이 이루어졌다. 강영웅 등의 실험결과와 같이 날개벽 보강이 비내진상세를 갖는 기둥에 우수한 내진성능을 부여하는 것으로 나타났다.

Kesner와 Billington^{13,14)}은 끼움벽 요소의 배근상세를 단순화하면서 손상제어 및 에너지소산능력의 증진을 위하여 시멘트 복합체에 2%의 PE 및 PVA 합성섬유를 혼합한 섬유보강 고인성 시멘트 복합체(Engineered cementitious composite, ECC)를 사용한 프리캐스트 패널을 활용하여 기존 골조의 내진보강성능을 제어할 수 있음을 해석 및 실험적으로 규명하였다. 국내에서도 윤현도¹⁵⁾ 등은 기존 골조에 현장타설 보통콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High performance fiber reinforced cement composite, HPRCC)를 사용한 끼움벽 요소를 보강한 골조 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 통하여 끼움벽 요소에 HPRCC를 활용함으로써 보통콘크리트 끼움벽에 비하여 보강상세를 단순화하며 강도 및 에너지소산능력을 현저하게 향상시킬 수 있다고 보고하고 있다. 김선우^{16,17)} 등은 단면형상, 배근상세 및 기존 골조와의 접합방법 등을 주요변수로한 프리캐스트 HPRCC 끼움벽 요소의 내진성능평가 실험을 통하여 설계기법을 제안하였다. 그러나 일련의 실험을 통하여 기존 골조에 비하여 끼움벽의 강성이 지나치게 크고 또한 끼움벽의 형상비가 작기 때문에 끼움벽으로 보강된 골조의 강도 및 강성증진 뿐만 아니라 연성을 증진하기 위해서는 골조의 손상에 앞서

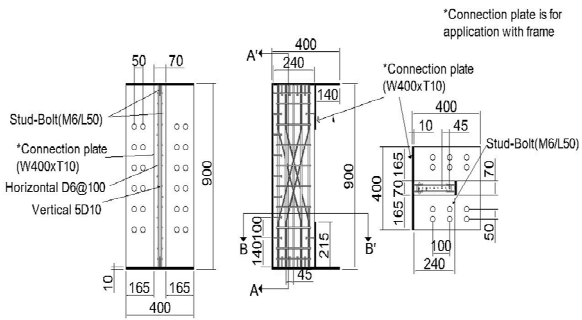
끼움벽 요소가 먼저 연성적인 파괴가 선행되는 것이 필요한 것으로 보고하고 있다. 양해준¹⁸⁾ 등은 끼움벽 요소의 거동을 제어하기 위하여 끼움벽에 수직 슬릿을 설치하여 끼움벽 요소의 형상비를 조절하는 방안을 제안하였다. 이들의 연구결과로부터 수직 슬릿에 의한 끼움벽 요소의 형상비를 조절함으로써 끼움벽의 구성재료에 따라 끼움벽 요소의 거동에 대한 제어가 가능한 것으로 보고하고 있다.

이상과 같이 현재까지 수행된 끼움벽으로 보강된 골조에 대한 실험 및 해석적 연구의 분석결과, 골조의 전면을 끼움벽 요소로 보강시 골조와 내진보강요소인 끼움벽 요소의 강성 차이로 인하여 골조의 상부부분에서 전단파괴되는 경향을 보이며 또한 끼움벽 요소의 형상비가 1.5 이하인 경우가 대부분으로 급격한 전단파괴 양상을 보인다. 따라서 끼움벽 설치에 따라 기존 구조물의 기능이 현저하게 저하될 우려가 있어 내진 보강된 골조의 강도, 강성 및 연성 증진뿐만 아니라 기능이 저해되지 않도록 날개벽 요소에 의한 기존 골조의 내진보강방법이 적용 가능성이 높게 평가된다. 특히 날개벽 요소의 강도 및 연성증진을 위하여 복잡한 배근상세가 요구되나 이러한 보강상세는 ECC 또는 HPRCC와 같은 고성능 섬유보강 시멘트 복합체를 적용하여 단순화할 수 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁵⁻¹⁹⁾ 이에 본 연구에서는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 일종인 ECC를 사용한 날개벽 요소 및 날개벽 요소로 보강된 골조의 내진보강성능을 실험적으로 평가하고자 한다.

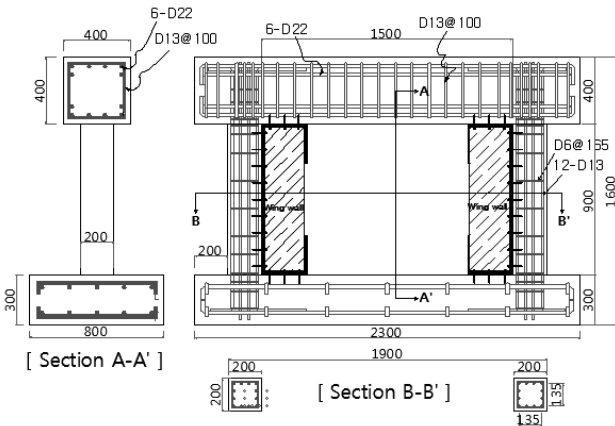
2. 날개벽 요소로 보강된 골조 실험

2.1 실험 계획

본 연구에서는 우수한 내진특성을 갖는 날개벽 요소를 제작하고자 시멘트 복합체에 섬유를 혼합한 ECC를 날개벽에 적용하였다. 굵은 골재를 함유하지 않는 ECC는 양생 시 건조 수축으로 인한 균열 발생을 최소화하기 위하여 프리캐스트(precast)로 제작하였으며, 수중양생을 실시하였다. ECC 날개벽 요소는 접합 방식에 따른 거동 특성을 비교하고자 2면 및 3면 접합 실험을 계획하였다. 또한 보강 후의 내진성능을 파악하고자 비내진상세를 갖는 골조와 날개벽을 보강한 골조 실험을 계획하였다. 이에 따른 실험체의 배근, 보강상세 및 일람을 Fig. 1 및 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 2에 나타낸바와 같이 2면 접합 실험체 W250-2는 상·하부 보 접합을 계획 하였으며, 3면 접합 실험체인 W250-3은 상·하부 보 및 기둥 접합을 계획하였다. 비내진상세를 갖는 골조 실험체(Reinforced Baring Frame, RBF)의 경우 날개벽 요소 보강을 위하여 케미컬 앵커를 접합하였다. 연결플레이트 강판은 SS400이며, 보강근으로 사용된 D6 및 D10 철근의 항복강도는 각각 349 및 495 MPa로 나타났다. RC 골조 기둥의 경우 주철근은



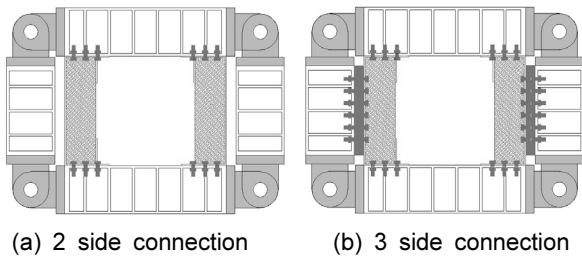
[Section A-A'] [Wing Wall Element] [Section B-B']



[Section A-A']

[Section B-B']

Fig. 1 Reinforcement detail and configuration of specimens



(a) 2 side connection

(b) 3 side connection

Fig. 2 Connection plan of specimens

D13을 사용하였으며, 나선철근은 $\phi 6$ 을 135 mm 간격으로 배근하였다. RBF의 콘크리트 압축강도는 25 MPa이며, 사용된 D13 및 $\phi 6$ 나선철근의 항복강도는 각각 445 및 291 MPa로 나타났다.

2.2 사용 재료

본 연구에서 사용된 ECC는 PVA (Polyvinyl alcohol)섬유를 전체 체적비의 2.1% 혼합하여 제조하였다. 사용된 PVA 섬유 기계적 특성은 Table 2에 나타난 바와 같이 인장

Table 1 Summaries of specimen

Specimen	f_{ck} (MPa)	$l_w \times h_w \times t_w$ (mm)		
W250-2	50	250×880×70		
W250-3				
RBF	21	-		
W250-3-RBF	Wing Wall	RC frame	Wing Wall	Column
	50	21	250×880×70	200×200×900

Table 2 Mechanical properties of PVA fiber

Fiber	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Diameter (μ m)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA	1.30	12	39	307	1,600	40

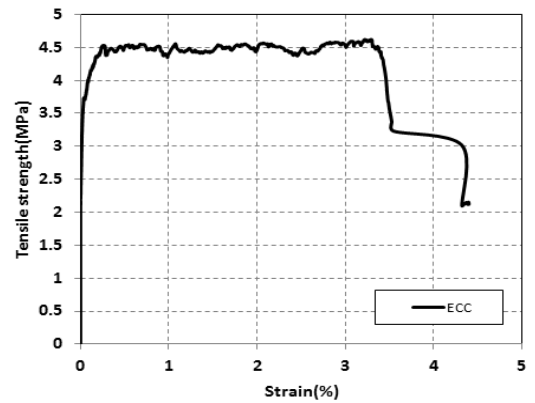


Fig. 3 Tensile strength-strain curve of ECC

성능이 우수한 섬유를 사용하였다. 또한 물-결합재비는 49%로 배합계획 하였으며, 사용된 배합은 Table 3에 나타내었다. 배합된 ECC를 날개벽 요소에 적용 시 재료의 역학적 특성에 따른 날개벽 요소의 거동특성을 규명하기 위하여 휨, 압축 및 인장성능평가를 실시하였다. 휨 강도 평가를 위해 40×40×160 mm의 각주형 시험체를 제작하였으며, KS L ISO 679에 준하여 시험하였다. 압축강도를 평가 또한 KS L ISO 679에 준하여 평가하였으며, 규준에 따라 휨 강도 시험에 의해 판단 된 시험체를 사용하였다. 인장강도 평가는 JSCE-E-531에 준하여 평가하였다. 덤벨형(dumbbell shape) 시험체를 제작하여 시험을 실시하였으며 결과를 Fig. 3에 그래프로 나타내었다. 시험 결과 또한 정리하여 Table 4에 나타내었다. 시험 결과, ECC의 압축특성은 보통 콘크리트에 비해 최대압축 강도 시 변형

Table 3 Mixture proportions of ECC

Composite type	W/B (%)	Fiber volume fraction (%)	Unit weight (kg/m ³)						
			Cement	Water	Silica Fume	Fly Ash	Filler	Super Plasticizer	Shrinkage Reducing Admixtures
ECC	49	2.1	489	448	33	375	685	4	49

Table 4 Mechanical properties of ECC

Cement composite	Compression			Flexure		Tension		
	Compressive strength (MPa)	Strain in maximum compressive strength (%)	Elastic modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Deflection at flexural strength (mm)	First-crack strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at peak (%)
ECC	55.3 (±2.17)	5.02 (±0.39)	20,553.5 (±0.62)	22.67 (±3.74)	3.57 (±1.33)	2.17 (±0.06)	4.53 (±0.09)	3.05 (±0.38)

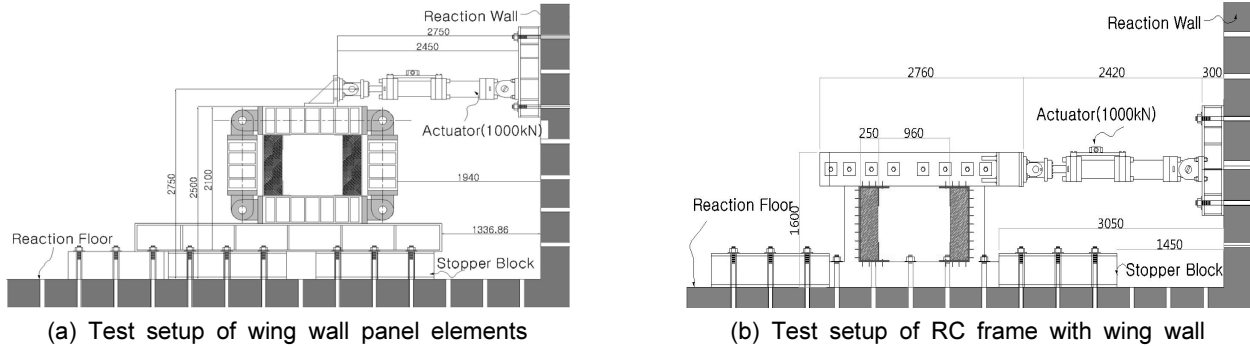


Fig. 4 Test setup of specimen

률이 높고 탄성계수가 낮게 나타났다. 휨 거동에서는 처짐경화특성을 보였으며 휨 강도 및 처짐에서 보통콘크리트보다 우수한 성능을 나타내었다. Fig. 3는 인장 강도 및 변형을 나타낸 것으로 인장 성능 평가결과 평균 2.17 MPa의 초기균열 강도를 나타내었으며, 최대 강도시까지 약 3.1%의 높은 변형능력을 나타내었다.

2.3 실험 방법

날개벽 요소 실험체의 설치상황은 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같다. 실제 거동과 유사한 거동모사를 위해 4점 회전단 가력형상을 제작하였다. 또한 2면 및 3면 접합 실험을 위해 날개벽 요소 연결 플레이트와 가력형상을 고력볼트로 고정하였다. 설치된 실험체는 반력벽에 설치된 1,000 kN 용량의 액추에이터(Actuator)를 사용하여 계획된 층간 변위에 따라 점증되는 변위 제어방식으로 2회씩 반복 가력하였다. 실험체의 외부면에 각 실험체의 층간변위, 슬립, 전단변위를 측정하기 위하여 날개벽 요소 상부에 변위계를 설치하였다. 비내진상세를 갖는 실험체와 날개벽이 보강된 골조 실험체의 설치상황은 Fig. 4(b)에 나타내었다. 실험체 가력을 위하여 가력 프레임을 상부 보에 설치하였으며, 가력 방식은 요소 실험과 동일하게 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

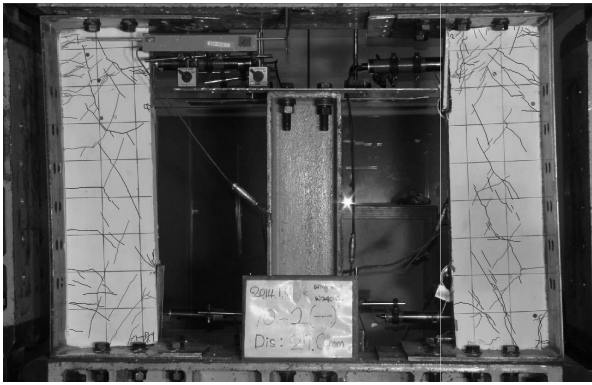
3.1. 균열 및 파괴 양상

Fig. 5는 각 실험체의 최종 파괴양상을 나타낸 것이다. 2면 접합된 날개벽 요소 W250-2 실험체에서는 층간변위

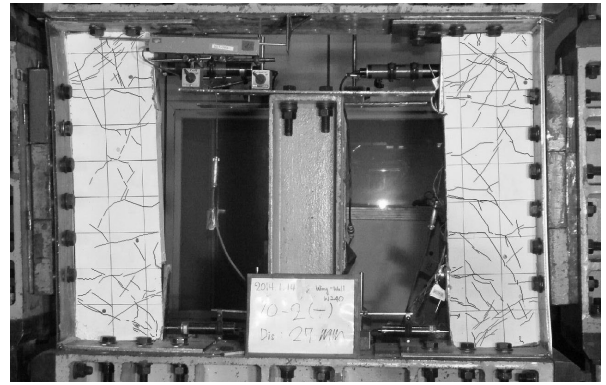
0.05%에서 초기 균열이 요소 양단부에 나타나기 시작하였으며, 층간변위가 증가함에 따라 균열이 점차 중앙부로 진전되는 양상을 보였다. 이러한 균열들은 약 100 mm~250 mm의 길이를 가지면서 층간 변위가 증가함에 따라 다수 발생되었다. 층간변위 0.2%에서는 중앙부에 경사균열이 발생하였다. 또한 층간변위 1.5%에서는 날개벽 요소 측면에 위치한 연결플레이트가 탈락하였으며, 실험이 진행됨에 따라 측면 플레이트 주변부에 압괴 현상이 발생하였다. 층간변위 2.5%에서부터 측면 연결플레이트와 날개벽요소가 분리가 되었으며, 균열의 진전 없이 최종 파괴되었다. 최종파괴 시 전체적인 균열의 발생부위는 날개벽 요소 전반에 걸쳐 고르게 발생되었다.

3면 접합된 날개벽 요소 W250-3 실험체의 경우, 층간변위 0.1%에서 요소 양단부에 균열이 발생하였다. 또한 층간변위 0.2%에서 날개벽요소 하부에서 중앙으로 경사균열이 발생되었다. 이러한 경사균열은 약 150 mm~250 mm의 길이를 가지면서 층간변위가 증가함에 따라 다수 발생하였다. 층간 변위 2%에서는 실험이 진행됨에 따라 측면연결플레이트의 영향으로 압괴현상이 발생하였으며, 층간변위 2.5%에서 날개벽 요소와 분리되었다. 이후 균열의 진전 없이 최종 파괴되었다. 또한 전체적인 균열의 발생부위는 날개벽 요소 전반에 걸쳐 고르게 발생되었다. 2면접합된 실험체의 경우 휨 지배로 인한 균열로 판단되며, 3면 접합된 실험체의 경우 전단 지배에 의한 균열 진전 양상을 보이는 것으로 판단된다.

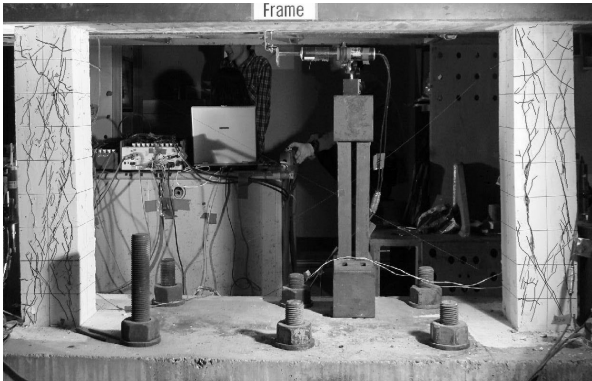
비내진상세를 갖는 RBF 실험체의 경우 층간변위 0.2%에서 초기 인장균열이 발생하였다. 또한 층간변위 0.5%에서 경사균열이 발생하기 시작하였고, 다수의 인장 균열이 발생하였다. 최대 하중이 발생한 층간변위 1.3% 전



(a) W250-2



(b) W250-3



(c) RBF



(d) W250-3-RBF

Fig. 5 Crack pattern of specimens at failure

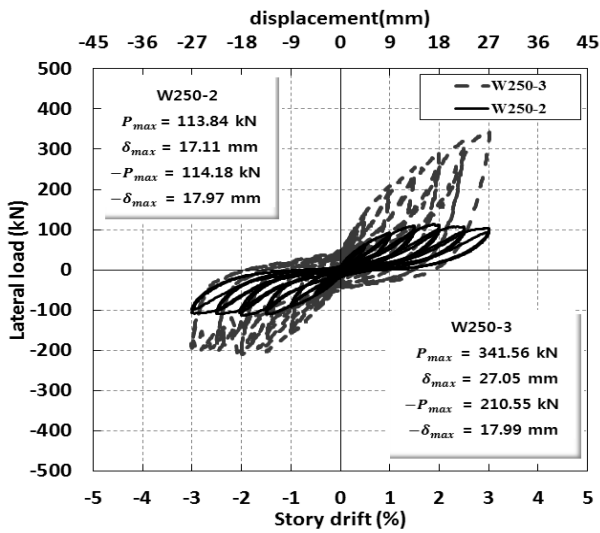
후로 다수의 인장균열과 전단균열이 발생하였으며, 최대 하중 이후 실험이 진행됨에 따라 균열 폭이 커지면서 기둥 중앙부에 콘크리트 박리현상이 일어났다. 또한 층간 변위 2%에서 균열이 기둥 하부에서 상부까지 전진양상을 보이며 최종 파괴되었다.

골조에 날개벽 요소가 보강된 W250-3-RBF 실험체의 경우, 층간변위 0.2%에서 초기균열이 날개벽 요소 양단부에 발생하였으며, 골조 기둥에 인장균열이 발생하였다. 층간 변위 1% 전후로 날개벽 요소와 RC 골조 기둥 전반에 걸쳐 경사 및 인장균열이 고르게 분포되었으며, 이러한 경사 균열은 약 150 mm~250 mm의 길이를 가지면서 층간변위가 증가함에 따라 다수 발생하였다. 날개벽 요소의 최종 파괴 시 균열은 전반에 걸쳐 발생하였다. 또한 최대하중이 발생한 1.3% 이후의 층간변위에서 RC 골조 기둥의 균열 폭이 증가하기 시작하였으며, 층간변위 2.5%에 이르러 기둥 중앙부의 콘크리트 박리가 발생하였다. 최종 파괴양상에서는 RC 골조의 콘크리트 박리현상이 더욱 심하게 나타나 철근이 표면에 드러났다. 일반적으로 내진 보강체가 선행 파괴 되어야 하지만 Fig. 5(d)와 같이 기존 골조가 먼저 파괴되는 양상을 보였다. 이는 ECC 날개벽이 과 보강 상세를 가져 RC 골조의 파괴가 크게 일어난 것으로 판단된다. 이에 날개벽 요소의 배근 상세완화 및 낮은 압축 강도의 ECC를 사용함으로써 내진 보강체의 선행파괴를 유도하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

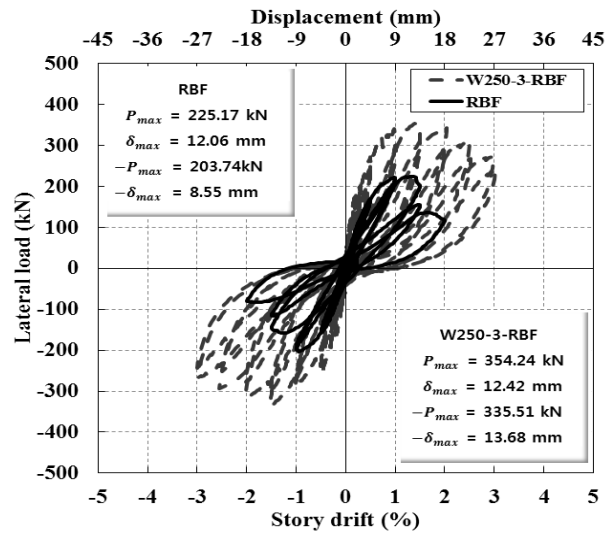
Fig. 5(d)에 나타난 바와 같이 RC 골조 기둥 중앙부에 균열 폭이 증가하며 콘크리트 박리현상이 일어났으며, 철근이 표면에 드러났다. 반면, ECC가 적용된 날개벽 요소에서는 균열 폭 증가가 완화되는 것으로 나타났다. 이는 날개벽에 적용된 ECC의 역학적 특성에 의해 균열 폭이 효과적으로 제어되어 날개벽 요소 전 부분에 걸쳐 응력 분포가 고르게 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 하중-변위 관계

Fig. 6은 각 실험체의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 2면 접합된 날개벽 요소 W250-2 실험체의 경우 최대 하중이 113.84 kN으로 나타났으며, 최대 하중 이후 완만한 내력감소를 보였다. 3면 접합된 날개벽 요소 W250-3 실험체의 경우 최대하중은 372.21 kN으로 나타났으며, 2면 접합한 실험체 보다 최대 하중이 226% 높게 나타났다. 변위가 증가할수록 내력상승이 계속 이루어졌으며, 이는 가력형강 모서리 부분에서 연결플레이트가 끼여 전면을 구속하기 때문에 하중이 계속 증가한 것으로 판단된다. 또한 날개벽 요소 제작 시 연결플레이트의 용접에 의한 열 변형으로 실험체가 기울어져 비대칭거동을 나타내었다. 비내진상세를 갖는 RBF 실험체의 경우 최대하중이 225.17 kN으로 나타났으며, 최대 하중 이후 내력이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 최대하중이후 실험체가 손상을 입으며 급격한 내력 감소현상을 나타낸 것으



(a) W250-2 and W250-3



(b) RBF and W250-3-RBF

Fig. 6 Load-displacement hysteresis curve of specimens

로 판단된다. 날개벽을 보강한 W250-3-RBF 실험체의 경우 최대하중은 354.24 kN으로 나타났으며, 최대하중 이후 연성적인 거동을 나타내었다. 이는 날개벽 요소 보강이 하중 감소를 완만하게 한 것으로 판단된다.

3.3 강성저하특성

Fig. 7은 각 층간변위 별 강성을 초기강성으로 무차원하여 층간변위 증가에 따른 강성저하특성을 나타내었다. Table 5는 각 실험체의 초기강성과 최대하중 시 강성 값을 나타내었다. 초기 강성 값은 3면 집합된 W250-3 실험체가 2면 집합된 W250-2 실험체 보다 높게 나타났다. 또한 ECC의 영향으로 강성저하가 완만하게 나타났는데, 이는 균열이 날개벽 요소 전면에 발생하며 하중을 분산시켜 연성적인 거동을 나타낸 것으로 판단된다. 비내진상세를 갖는 RBF 실험체의 경우 급격한 강성저하가 나타났다. 이는 최대강도 이후 기둥 중앙부에 콘크리트가 손상되어 급격한 강성저하를 나타낸 것으로 판단된다. 골조에 ECC 날개벽이 보강된 W250-3-RBF 실험체의 경우 비내진상세를 갖는 RBF 실험체 보다 강성 저하율은 크게 나타났다. 이는 Table 5에 나타내었듯이 W250-3RBF 실험체의 초기강성이 RBF 실험체 보다 약 3배 정도 높게 나타났으며, 이에 따라 초기강성으로 무차원하여 나타내었을 때 저하율이 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 보강을 했을 경우 강성이 크기 때문에 실험이 진행됨에 따라 골조 및 날개벽 요소의 손상이 크게 발생하여 강성 저하 값이 더 큰 것으로 판단된다. 반면, 최대 하중 이후 강성에서 계속적으로 연성적인 저하율을 나타낸 것으로 보아 날개벽 보강이 비내진상세를 갖는 구조물에 우수한 강성증진 효과를 부여할 것으로 판단된다.

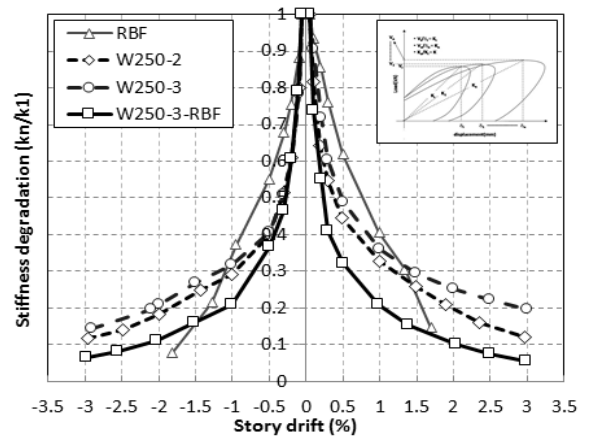


Fig. 7 Cyclic stiffness degradation

Table 5 Stiffness property of all specimens

	Initial stiffness (kN/mm)	Stiffness at maximum load (kN/mm)	Stiffness reduction ratio between initial and maximum load (%)
W250-2	31.8	6.7	79.1
W250-3	64	10.4	83.7
RBF	61.1	18.7	69.5
W250-3-RBF	185.3	28.5	84.6

3.4 에너지소산 특성

Fig. 8은 각 사이클별 2회의 반복가력에 대한 면적을 적분하여 누적에너지소산 면적을 나타낸 것이다. 나타난 바와 같이 2면 집합된 W250-2 실험체 보다 3면집합된 W250-3 실험체에서 보다 우수한 에너지소산 능력을 나타내었다. 반면, RBF 실험체의 경우 층간변위 1.5% 이후에 누적에너지소산면적의 증가는 미소하게 나타났다. 이

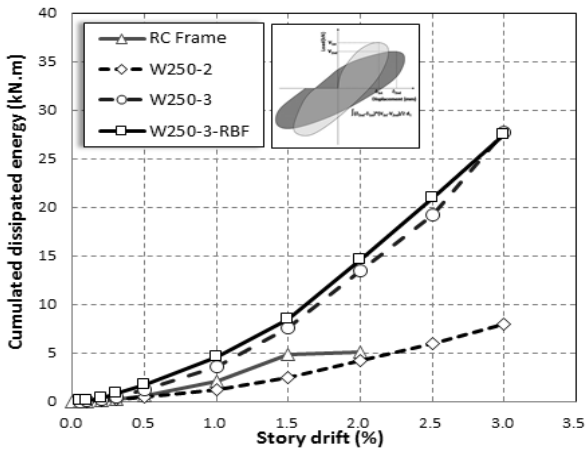


Fig. 8 Accumulated energy dissipation capacities

는 최대 하중 이후 기둥 중앙부의 콘크리트가 박리되면서 급격한 내력 저하의 영향으로 판단된다. 비내진상세를 갖는 RBF 실험체보다 골조에 날개벽 요소를 보강한 W250-3-RBF 실험체의 경우 층간변위 2%에서 보다 큰 누적에너지소산면적을 나타내었다. 이는 날개벽 요소의 보강이 RBF 실험체의 우수한 에너지소산 능력을 부여한 것으로 판단된다. 또한 W250-3 실험체의 경우 층간변위 3.0%에서 W250-3-RBF 실험체 보다 높은 누적에너지소산면적이 나타났다. 이는 W250-3 실험체의 경우 Fig. 3 및 4에서 균열 특성 및 하중-변위곡선을 나타낸 바와 같이 실험체의 균열이 발생함에도 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 누적에너지면적은 층간변위 3%에서 W250-3-RBF 실험체 보다 높게 나타났다. 그러나 이는 3.2절에서 기술한 바와 같이 날개벽 요소 연결 플레이트가 가력형강 모서리에 끼여 전체 면을 구속함에 따라 과대평가 된 것으로 판단된다.

3.5 날개벽 요소 강도 산정

본 연구에서는 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003에 이르는 시점으로 부재의 파괴 시점을 정의하였다. ECC는 Table 4에 나타내었듯이 변형률이 우수한 특성을 갖는다. 이에 변형률을 0.005로 부재의 파괴시점을 정의하여 강도 산정을 실시하였다. 휨 해석을 위하여 변형 전에 부재 축에 수직인 평면은 변형 후에도 부재 축에 수직인 것으로 가정하였으며, 중립축 하부의 콘크리트는 무시하였다. 또한 콘크리트와 철근의 일체를 가정하여, 동일선상에 위치하는 재료의 변형률은 동일한 것으로 가정하였다. 휨 해석을 위하여 변형률 분포가 완전 합성거동인 형태와 완전 비 합성거동인 형태로 구분하여 해석을 실시하였다. 완전합성의 경우 골조의 전면에 변형률이 선형이면서 연속적으로 분포하는 이상적인 형태로 기둥의 최외측 콘크리트의 변형률이 0.003이 되는 시점을 근거로 하여 응력분포를 산정한 뒤 저항 모멘트를 계산하였다. 비합성거동의 경우 골조를 구성하는 양쪽 기둥과 내부에

보강된 날개벽 요소가 개별적인 변형률 분포를 나타내는 것으로 기둥은 최외측 콘크리트의 변형률이 0.003, 날개벽 요소 최외측복합체의 변형률이 0.005 시점으로 정하고 각각의 저항모멘트를 산정하여 합을 나타내었다. 시멘트복합체의 압축 및 인장응력은 단면을 동일한 등분으로 나누어 산정하였으며, 철근은 중앙부의 변형을 기준으로 하여 산정하였다.

ECC 압축 재료모델은 식 (1)과 같이 Hognestaed 모델을 기준으로 하였으며,¹⁹⁾ 지수를 1.3으로 수정하여 적용하였다. 여기서 ϵ_0 는 0.004로 적용하였으며, ϵ_u 는 0.005를 적용하였다.²⁰⁾ 또한 콘크리트 압축 재료 모델의 경우 ϵ_0 는 0.0025로 적용하였으며, ϵ_u 는 0.003으로 적용하였다. ECC의 인장 재료모델은 식 (2)과 같이 일본토목학회의 제안²¹⁾에 따라 산정하였다. 철근이 부담하는 인장력의 크기가 ECC에 비하여 상대적으로 크기 때문에 인장강도가 아닌 초기균열강도(f_{cr})를 사용하였으며, 변형률에 관계없이 초기균열강도를 1.3을 나눈 값으로 산정하였다.

$$C_c = f_c'' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0 \text{ (for Concrete)} \quad (1)$$

$$C_c = f_c'' \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^{1.3} \right], 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0 \text{ (for ECC)}$$

$$C_c = f_c'' \left[1 - \left(\frac{0.2}{\epsilon_u - \epsilon_0} \right) (\epsilon_c - \epsilon_0) \right] \text{ for } \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u \quad (2)$$

$$T_c = (f_{cr}/1.3)(d - c)b$$

여기서, ϵ_0 는 최대강도 시 변형률을 나타내며, ϵ_c 는 최대강도 시까지의 변형률, ϵ_u 는 극한변형률, C_c 는 압축력의 크기, f_c'' 는 콘크리트 및 ECC의 압축강도, T_c 는 ECC의 인장력, d 는 날개벽의 높이(mm), c 는 중립축(mm), b 는 날개벽의 두께(mm)를 나타낸다.

철근의 응력은 항복강도까지 선형적인 증가를 나타내고, 항복 이후에는 소성변형으로 모델링하였다. 또한 전단강도는 ACI 318-11규준에 의하여 산정하였다. 여기서 철근 콘크리트 V_c (kN), 전단철근 V_s (kN) 및 대각보강근 V_d (kN)의 공칭 전단강도는 식 (3)으로 산정하였다.

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_{ck}} bd$$

$$V_s = \frac{A_{vs} f_y d}{s} \quad (3)$$

$$V_d = 2A_{vd} f_y \sin \alpha$$

여기서, λ 는 경량콘크리트계수 1.0을 사용하였으며, f_{ck} 는 시멘트복합체의 압축강도(MPa), b 는 ECC날개벽 요소의 두께(mm), d 는 폭(mm), A_{vs} 는 사용된 전단철근의 공칭단면적(mm^2), f_y 는 전단철근의 항복강도, A_{vd} 는 사용된 대각보강근의 공칭단면적(mm^2), α 는 대각보강근의 각도($^\circ$)를 나타낸다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A1A2066034)의 지원에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Ghosh, S. K., Fanella, D. A., and Liang, X., "Seismic and Wind Design of Concrete Buildings", International Code Council, 2005, pp.560.
2. 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 Retrifit of Structures, Ann Arbor, Michigan, 1981, pp.189-246.
3. Koream Institute of Civil Engineering and Building Technology, "Rehabilitation Method of Earthquake-Damaged Structure", 2002.2.
4. National Emergency Management Agency, 'Result notice of the promotion of public facilities seismic strengthening existing measures in 2011', 2012. (<http://www.nema.go.kr>).
5. Ersoy, U. and Uzsoy, S., "The Behavior and Strength of Infilled Frame", TUBITAK MAG-205 Report, Ankara, Turkey, 1971, pp. 95.
6. Baran, M. and Tankut, T., "Experimental Study on Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frames by Precast Concrete Panels", ACI Structural Journal, Vol.108, No.2, 2011, pp.227-237.
7. Kaltakci, M. Y. and Yavuz, G., "The Seismic Improvement and control of weak concrete frames with partial concrete shear walls", Journal of Vibration and Control, 107754 6312467220, 2013, pp.1-18
8. Park, K. Y., Koo, E. S., and Hong, S. M., "Behavior of Reinforced Concrete Frame with Infill Wall", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.12, No.12, 1996, pp.159-165.
9. Han, M. K., Lee, H. Y., Kim, S. W., Lee, K. W., Choi, C. S., and Yun, H. D., "A Nonlinear Finite Element Analysis to Reinforced Concrete Frame Retrofitted with Cast-In Plate Infilled Shear Wall", Korea Concrete Institute Conference, 2005, pp.73-76.
10. Lee, H. Y., Kim, S. W., Park, W. S., Lee, G. W., Choi, C. S., and Yun, H. D., "Structural Performance of Cast-In-Place Infill Wall Frames Using High Performance Fiber Reinforced Cement Composite", Korea Concrete Institute Conference, 2005, pp.275-278.
11. Kang, Y. W., "Structural Behavior of the Wing Walls with Column", Kwangwoon University, 2008, Mater's Thesis
12. Kabeyasawa, T., "Experimental Study on Columns with

실험에서 측정된 값을 근거로 하여 기둥최하부에 발생 되는 모멘트를 산정하였으며, 전단력의 경우 실험값에서 바로 도출하여 비교하였다. 실측값과 이론값을 비교하였을 경우 2면 접합된 W250-3 실험체와 3면 접합된 W250-3 실험체는 부분 합성 거동을 나타내었다. 3면 접합의 경우 가력형강 전면을 구속하며 거동하기 때문에 완전 합성거동에 가까운 거동을 나타내었다. 그러나 W250-3 실험체의 경우 예측값 보다 높게 나타났다. W250-3 실험체의 경우 요소의 연결플레이트가 프레임에 사이에 끼여 하중이 계속적으로 증가하였기 때문에 비교하기 어려움이 있다. W250-3-RBF 실험체의 경우 ECC 날개벽 요소가 상하부 보 및 기둥에 보강되어 완전합성거동에 가까운 부분 합성 거동을 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 ECC 날개벽 요소의 면 접합방식에 따른 내진성능을 실험적으로 평가하였다. 또한 비내진상세를 갖는 기존 RC 골조에 우수한 성능을 갖는 날개벽 요소를 적용하여 보강효과 따른 내진성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비내진상세를 갖는 기존 골조 실험체 RBF에 경우, 기둥 중앙부에 전단균열이 발생하며 콘크리트의 박리현상으로 급격한 파괴양상을 나타내었다. 반면, ECC 날개벽이 보강된 RC 골조의 경우 기둥 파괴 이후 연성적인 파괴거동을 나타내었다. 보강 실험체가 기존골조에 비해 손상이 적은 것으로 나타났으며, 추후 상세완화를 통해 보강요소의 손상을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) ECC 날개벽 요소를 보강함에 따라 내력이 36.44% 증가하는 것으로 나타났으며, 에너지손상 및 강성저하 특성에서 우수한 성능을 나타내었다. 실험 결과를 근거로 ECC 날개벽 요소가 우수한 역학적 특성에 기인한 것으로 판단된다.
- 3) 면 접합방식에 따른 내진성능 평가는 3면 접합된 W250-3 실험체가 2면 접합된 W250-2 실험체 비해 높은 내력을 나타내었다. 이는 3면 접합의 경우 철골프레임이 전체를 구속하여 거동하면서 강도저하 없이 내력이 지속적으로 상승하였기 때문으로 판단되며, 실제 보 및 기둥과의 접합에서는 RC 골조의 기둥파괴 이후에 강도가 감소할 것으로 판단된다.
- 4) 3면접합의 경우 요소 실험 시 하중의 감소 없이 변위 증가에 따라 계속 증가하여 내력산정에는 어려움이 있으나, 기존 구조체와의 합성거동 평가를 위하여 3면접합을 실시하였다. 이에 3면 접합된 W250-3-RBF에서 우수한 내진성능을 갖는 결과를 나타내었다. 실험 결과를 근거로 ECC날개벽 보강이 비내진상세를 갖는 구조체에 우수한 내진특성을 부여할 것으로 판단된다.

- Wing Wall Failing in Shear”, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.30, No.3, pp.115-120.
13. Kesner, K. and Billington, S. L., “Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit. Journal of Structural Engineering”, Vol.131, No.11, 2005, pp.1712-1720.
 14. Kesner, K. E. and Billington, S. L., “Experimental response of precast infill panel connections and panels made with DFRCC”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.3, 2003, pp.327-333.
 15. Yun, H. D., Kim, S. W., Lee, G. W., Choi, C. S., and Lee, H. Y., “Seismic Performance of Lightly Reinforced Concrete Frames with High Performance Fiber Reinforced Cement Composite Infill Walls”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.22, No.5, 2006, pp.31-38.
 16. Kim, S. W., Yun, H. D., Jang, G. S., and Yun, Y. J., “Seismic Performance of Precast Infill Walls with Strain-Hardening Cementitious Composites”, Journal of Korea Concrete Institute, Vol.21, No.3, 2009, pp.327-335.
 17. Kim, S. W., Yun, H. D., and Jang, Y. H., “Structural Performance of Precast Infill Walls as a Damage-Fuse Element for Seismic Retrofit”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol.25, No.3, 2009, pp.43-50.
 18. Yang, H. J., Kang, S. W., Jang, S. J., Yu, Z. J., Han, S. J., and Yun, H. D., “Evaluation of Seismic Performance on Precast Infill Walls with Displacement Capacity and Slit Shape”, Architectural Institute Conference of Korea, Vol.32, No.2, 2012, pp.433-434.
 19. Hognestad, E., “A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members”, University of Illinois bulletin, Vol.49, No.22, 1951.
 20. Lee, S. C., Kim, J. H., Cho, J. Y., and Shin, K. J., “Tension Stiffening of Reinforced High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPRC)”, Journal of Korea Concrete Institute, Vol.22, No.6, pp.859-866.
 21. JSCE, “Evaluation and application of fiber reinforced mortar with multiple fine cracks”, Tokyo: JSCE, concrete engineering series 64.

요약 본 논문에서는 고인성 시멘트 복합체(ECC)가 적용된 날개벽 요소의 면 접합방식에 따른 평가를 실시하였다. 또한 비내진상세를 갖는 RC 골조에 ECC날개벽 요소 보강하여 보강 유무에 따른 내진성능평가를 실시하였다. 면 접합 방법에 따른 거동 특성을 비교하기 위하여 2면 접합은 상·하부 보에 3면 접합은 상·하부 보 및 기둥에 접합하여 실험을 실시 하였다. 또한 비내진상세를 갖는 기존 구조체와의 일체로 거동하는 합성거동을 위해 3면 접합 방식으로 ECC날개벽 요소 보강을 실시하였다. ECC날개벽 요소 실험과 골조 실험은 점증되는 층간변위에 따라 2회씩 반복가력하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 ECC 날개벽 요소 실험체의 경우 3면 접합이 2면 접합보다 우수한 내진성능 나타내었다. 각각의 실험체는 우수한 재료 특성으로 인하여 미세한 다수의 균열이 ECC날개벽 요소 전면에 폭넓게 분포하였다. 또한 보통 콘크리트와 달리 최대강도 이후 연성적인 거동을 나타내었으며, 이에 우수한 에너지소산능력을 나타내었다. ECC날개벽 요소를 보강한 실험체와 기존 골조에서는 ECC날개벽 요소 보강에 따른 최대강도 이후 연성적인 거동을 나타내었다. 이에 따라 에너지소산능력이 증가하였으며, 강성저하 또한 완만한 곡선을 나타내며 기존 골조보다 우수한 내진특성을 나타내었다. 이에 ECC 날개벽 요소의 보강이 비내진상세를 갖는 구조체에 우수한 내진특성을 부여하는 판단된다.

핵심용어 : 고인성 시멘트 복합체(ECC), 날개벽 요소, 비내진상세