

강판콘크리트 구조 시스템을 적용한 기존 철근콘크리트 골조의 내진성능평가

박성현¹ · 오근영² · 김선훈¹ · 이강민^{3*}

¹석사과정, 충남대학교, 건축공학과, ²전임연구원, 한국건설기술연구원, ³교수, 충남대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of RC Frames Reinforced with Steel-Plate Concrete System

Park, Sung-Hyun¹, Oh, Keunyeong², Kim, Sun-Hoon¹, Lee, Kangmin^{3*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

²Researcher Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

³Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Abstract - In this study, an experimental study was conducted to secure seismic performance by reinforcing steel-plate concrete systems on existing RC structures that are vulnerable to earthquake loads such as piloti structures. Specimens with two different types of steel-plate concrete installed on unreinforced RC structures were fabricated and cyclic loading tests were conducted to evaluate the seismic performance. As a result, in the case of the specimen which reinforced the entire steel-plate concrete, strength and stiffness were improved significantly, but due to excessive stiffness, rapid cracking and failure of the RC frame observed. The test specimen reinforced with modular steel-plate concrete members also had the effect of enhancing strength, and ductility ability. It showed better performance in stiffness and energy dissipation capacity after the yield point of the steel plate. Therefore, it is considered that a sufficient seismic reinforcement effect can be expected if steel plate concrete is used as a reinforcement material for existing RC structures.

Keywords - Steel-plate concrete, Reinforced concrete, Seismic reinforcement, Seismic performance evaluation, Modularization

1. 서론

최근 우리나라의 지진 발생은 그 횡수와 빈도가 급증하고 있는 상황이며, 특히 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진은 기존 소규모 다가구 주택의 철근콘크리트 건축물에 많은 구조적 피해를 야기하였다. 이에 우리나라는 최근 기존 철근콘크리트 구조물의 내진성능을 확보할 수 있는 다양한 내진보강공법에 관한 연구를 수행하고 있다. 일반적으로 내진보강공법은 구조물의 연성을 증가시키는 방법과 강도 및 강성을 증가시키는 방법으로 구분된다^[1]. 연성보강공법은 램퍼와 같은 제진장치를 구조물에 설치하여 지진하중을 감쇠

하도록 하는 공법으로 장비 설치비용이 고가인 단점이 있다. 강도 및 강성보강공법은 기존 구조물 내에 새로운 부재를 추가로 설치하여 구조물 자체의 강도 및 강성을 증가시키는 방법으로, 일반적으로 가새, PC 날개벽, 내부 철골조, 그리고 강판콘크리트 보강 공법 등이 사용된다.

그 중 강판콘크리트(steel-plate concrete, SC) 보강 공법은 두 개의 강판 사이에 콘크리트를 채워 넣은 벽체를 형성하고 강판 내측면에 스테드(stud) 또는 타이 바(tie bar)와 같은 전단연결재를 활용하여 강판과 콘크리트가 일체로 거동하도록 하는 구조물이다. 시공 시 강판이 거푸집의 역할을 수행하여 별도의 거푸집 탈형 과정을 생략하는 등 공기 단축에 큰 효과가 있다^[2]. 또한 콘크리트 표면에 설치되는 강판의 뛰어난 연성효과를 활용하여 급격한 취성 파괴의 단점을 가지는 콘크리트에 적합한 보강방법으로 판단된다^[3]. 이러한 장점으로 인하여 국내에서는 강판콘크리트 시스템을 주로 원전시설물의 전단벽시스템으로 활용하고 있다.

Cho *et al.*^[4]은 비보강 강판콘크리트 전단벽을 대상으로 횡방향 정적가력 실험을 실시하여 강판콘크리트 전단벽의

Note.-Discussion open until October 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 02, 2021; revised March 22, 2021; approved on March 22, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-5625 Fax. +82-42-823-9467

E-mail. leekm@cnu.ac.kr

거동특성과 파괴형태를 파악하고 설계기준의 강도 계산식을 검토하였다. 이를 통해 강판콘크리트가 큰 연성능력을 보유하고 강판 내부 콘크리트의 구속효과를 통해 구조물의 내진성능에 기여할 수 있다는 사실을 밝혀냈으나, 현행 강판콘크리트의 면내전단강도 산정식에 의한 이론치 대비 실험 결과치는 약 14% 수준인 것으로 나타났다.

Lee et al.^[5] 및 Hwang et al.^[6]은 원자력발전소에서 주로 사용되는 철근콘크리트와 강판콘크리트의 이질접합부에 대한 구조적 성능을 평가하였다. Lee et al.^[5]은 철근콘크리트와 강판콘크리트의 합성 구조물을 L형 및 I형으로 제작하였고, 각 실험체에 대한 면외 휨강도 및 면내 전단강도를 측정하여 이론식과 비교분석하였다. Hwang et al.^[6] 또한 L형태의 철근콘크리트와 강판콘크리트의 합성 구조물을 제작하여 휨 실험을 통한 거동 특성을 확인하였다.

이처럼 현재까지의 강판콘크리트 시스템은 주로 원자력 발전소 구조물에만 제한적으로 사용되어 관련 연구도 그에 초점이 맞춰져 있어 일반 건축물에 적용한 사례는 거의 없는 실정이다. 지진하중에 매우 취약한 소규모 다가구 주택 건축물에 강판콘크리트 시스템을 적용한 내진보강을 수행한다면, 충분한 구조적 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

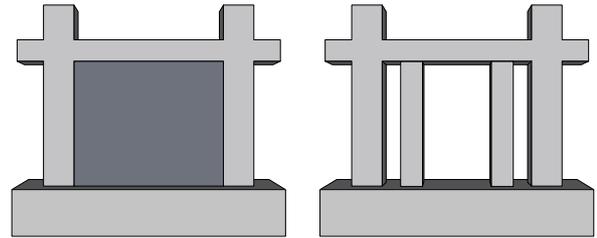
따라서 본 연구에서는 포항 지진에서의 철근콘크리트 구조물 피해 사례를 토대로 기존 철근콘크리트 구조물에 강판콘크리트 시스템을 통한 보강공법에 관한 실험을 계획하였다. Ha et al.^[1]에 의해 기(既) 실시된 별도로 보강하지 않은 기존 철근콘크리트 구조물 실험체에 서로 다른 형태의 강판콘크리트 시스템으로 보강한 실험체 두 종류를 제작하여 내진성능 평가를 수행하였다. 기존 골조에 강판콘크리트 시스템을 전면 보강한 실험체와 강판콘크리트 시스템을 모듈화하여 보강한 실험체를 변수로 설정하여, 기 수행된 기존 철근콘크리트 실험체 대비 강판콘크리트 시스템을 적용한 실험체의 내진성능 향상 정도를 분석하였다.

2. 실험연구 계획

2.1 실험개요

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 골조 실험체에 강판콘크리트 구조 시스템을 적용한 실험체의 내진성능을 비교하여 강판콘크리트 시스템을 적용한 구조물의 내진보강 효과에 대하여 분석하였다. 보강 실험체는 Fig. 1(a)와 같이 기둥과 보 하부 공간 전체를 강판콘크리트 시스템으로 보강하는

형태와, 시공 근로자의 작업성 및 강판콘크리트의 높은 강성으로 인한 철근콘크리트의 주요 구조부재(기둥 및 보)의 파괴 등을 고려하여 Fig. 1(b)와 같이 강판콘크리트를 기둥과 일정거리를 이격시킨 후 보의 일부분을 강판으로 추가 보강하는 형태로 모듈화 설계하였다.



(a) Fully reinforced (b) Modular partially reinforced

Fig. 1. Concept of steel plate concrete reinforcing system

2.2 실험체 설계

본 연구에 사용된 기존 철근콘크리트 구조물은 Ha et al.^[1]에 의해 기 수행된 기존 실험체(BF)를 준용하여 제작하였다. 콘크리트 압축강도는 24 MPa이고, 기존 노후화된 RC구조물의 특성을 반영하고자 일반적으로 철근콘크리트 구조물에 사용되는 SD400 철근이 아닌 SD300 철근을 사용하여 내진보강이 필요한 실제 건축물 크기의 1/2로 모사하였다. 기둥 및 보의 주근은 D16, 띠철근은 D10을 사용하였다. 기둥의 단면은 300 mm × 300 mm, 길이는 1,575 mm, 보는 단면 350 mm × 300 mm, 길이는 2,200 mm로 제작하였다.

강판콘크리트 시스템의 경우, 보강되는 강판과 콘크리트의 부재 크기가 커질수록 강판콘크리트 구조물 자체의 강도 및 강성이 증가하여 실험여건상 액츄에이터(actuator)의 용량을 고려하여 강판의 두께를 설계하였다. 액츄에이터의 용량과 강판콘크리트의 면내전단강도를 비교하였을 때 적절한 강판의 두께는 1.6 mm로, 내진구조용 SN강재의 경우 1.6 mm 두께의 강판을 확보하는데 어려움이 있어 SS275 강재를 활용하였다. 전체 보강 강판콘크리트(RSC_FR)는 SS275 강재의 최소두께인 1.6 mm를 사용하여 제작하였고, 강판과 콘크리트의 부착력 확보를 위해 지름 10 mm의 전단연결재를 200 mm 간격으로 배치하였다. 양 기둥에 강판콘크리트를 용접하기 위하여 두께 3.0 mm의 보강 강판을 기둥 안쪽면에 M16 케미컬 앵커를 활용하여 고정하였다.

모듈화한 강판콘크리트 보강 실험체(RSC_MR)는 두께 300 mm, 높이 1,575 mm의 세장한 강판콘크리트 부재 2개를 제작하여 양 기둥과 100 mm 이격되도록 제작하였다. 액

츄에이터 반복 가력 시 기존 철근콘크리트 구조물에 강판콘크리트에 의한 전단력이 작용하여 기존 구조물의 보 부재와 기초판에 손상을 입힐 수 있다고 판단하여 기존 철근콘크리트 구조물의 보와 기초판에 강판콘크리트와 동일한 강판을 덧대어 앵커볼트로 고정 보강하였다. 이때 과도한 앵커볼트 보강으로 인하여 시공성이 저하되고 콘크리트의 국부적인 쪼개짐이 발생할 우려가 있어 이를 방지하고자 앵커볼트를 엇모 배치하여 설계하였다. Table 1과 Fig. 3은 각 실험체별 일람표 및 상세 도면이다.

기존 철근콘크리트 구조물에 강판콘크리트를 보강하는 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 우선 기존 실험체(BF)의 양기둥에 보강 강판을 고정하기 위한 케미컬 앵커 삽입 구멍을 천공하고, 기둥의 보강 강판과 강판콘크리트의 벽체 강판을 용접하여 강판콘크리트 보강 부재의 틀을 제작하여 콘크리트를 타설하였다. 이후 양생이 완료된 강판콘크리트 보강

부재는 기존 실험체에 안착시키고 실험체 기둥과 강판을 케미컬 앵커로 체결하였다. 마지막으로 철근콘크리트의 보·기초판과 벽체 강판이 접하는 상·하단에 에폭시를 주입하여 철근콘크리트 구조물과 강판콘크리트 보강재를 일체화 하도록 실험체를 제작하였다.

2.3 강도설계식 검토

강판콘크리트 시스템으로 보강된 실험체들(RSC_FR 및 RSC_MR)의 실험결과를 설계기준 이론값과 비교하기 위해 본 연구에서는 대한전기협회 전력산업기술기준(KEPIC SNG)^[7]에서 제시하는 강판콘크리트의 면내전단강도 산정식을 이용하였다. 전력산업기술기준의 강판콘크리트 구조 기준에서는 비보강 강판콘크리트 벽체의 공칭면내전단강도(V_n)를 식 (1a)과 같이 규정하고 있다.

Table 1. Test specimens

Specimen	Reinforcement	Reinforced SC member	Used materials
BF	-	-	$f_{ck} = 24$ MPa, Rebar: SD300
RSC_FR	Steel-plate concrete (SC)	□-2,200×50×1,575	$f_{ck} = 24$ MPa, Rebar: SD300 Steel plate of SC system: SS275, $t = 1.6$ mm Steel plate of reinforcing RC members: SS275, $t = 1.6$ mm Chemical anchor: M16, Stud: M10
RSC_MR	Steel-plate concrete (SC)	□-300×100×1,575 (×2)	$f_{ck} = 24$ MPa, Rebar: SD300 Steel plate of SC system: SS275, $t = 1.6$ mm Steel plate of reinforcing RC members: SS275, $t = 3.0$ mm Chemical anchor: M16

BF: bare frame, RSC = reinforced steel-plate concrete, FR: full reinforced, MR: module reinforced

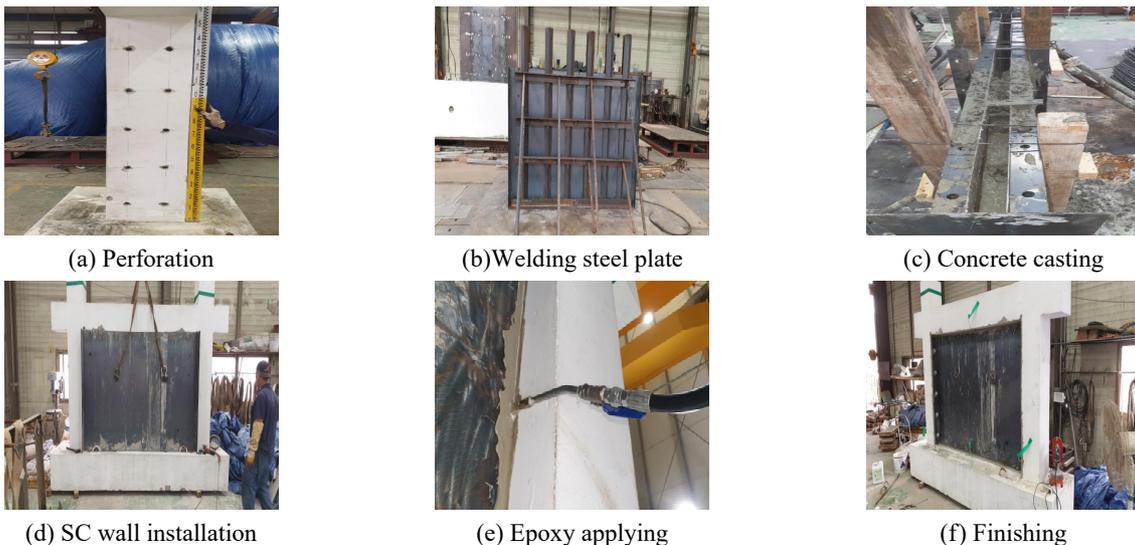
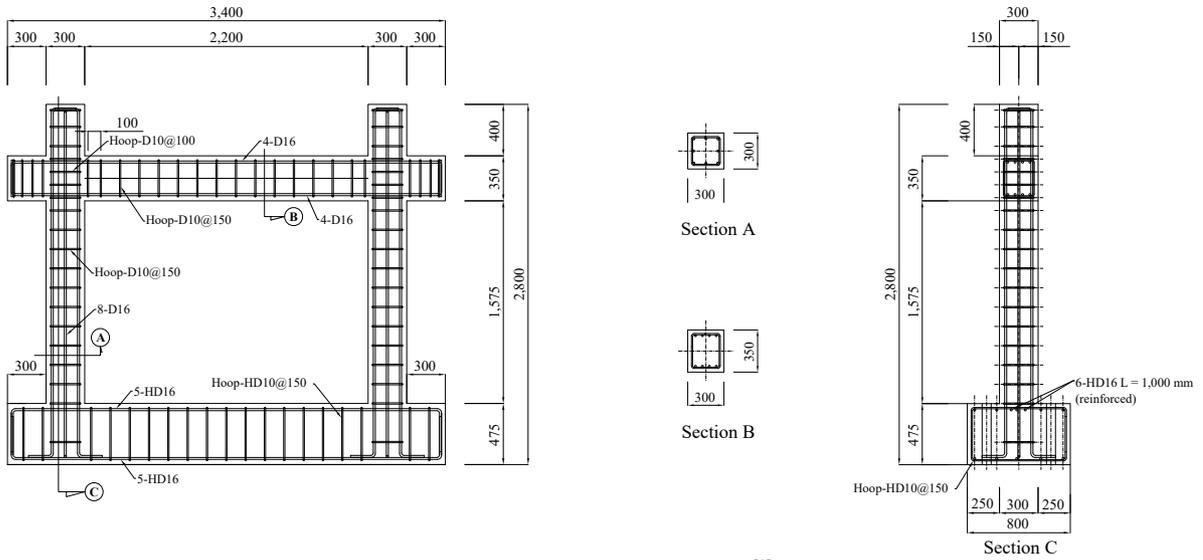
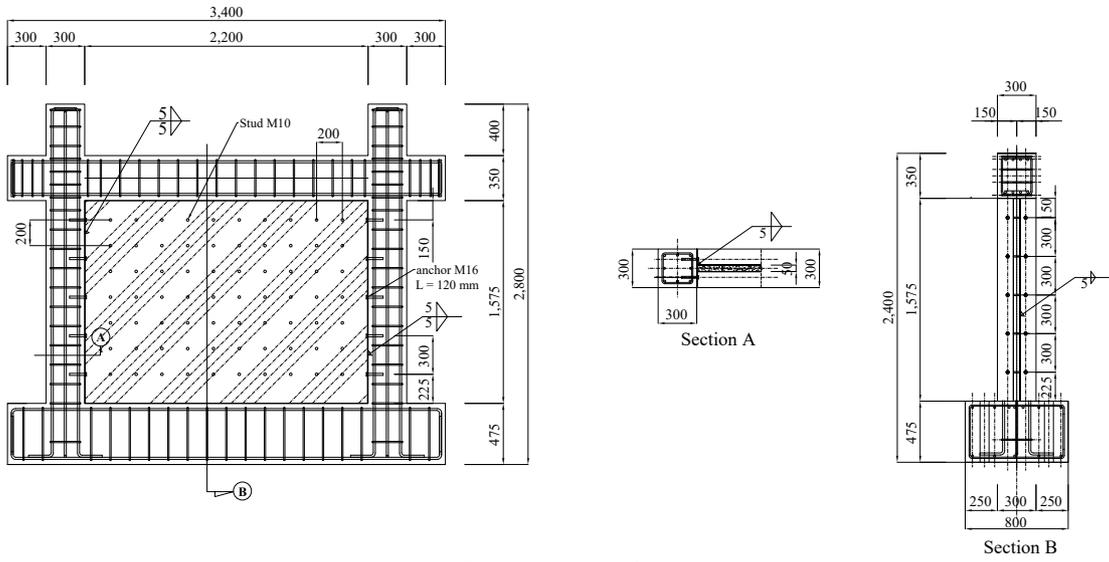


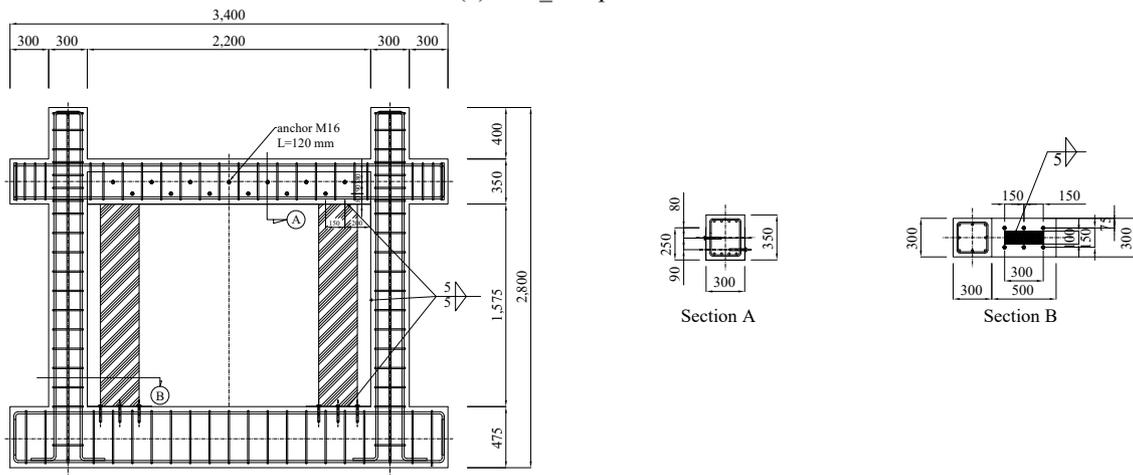
Fig. 2. Steel-plate concretes reinforcing process



(a) BF specimen proposed by Ha *et al.*^[1]



(b) RSC_FR specimen



(c) RSC_MR specimen

Fig. 3. Details of specimens

$$V_n = 2 \frac{K_\alpha + K_\beta}{\sqrt{3K_\alpha^2 + K_\beta^2}} F_{yp} A_p \quad (1a)$$

다만,

$$K_\alpha = 2G_s A_p \quad (1b)$$

$$K_\beta = \frac{1}{\frac{4}{E'_c A_c} + \frac{1 - \nu_s}{E_s A_p}} \quad (1c)$$

여기서, F_{yp} : 표면강판의 설계기준항복강도(MPa)

A_p : 한쪽면의 표면강판 단면적(m²)

A_c : 콘크리트 단면적(m²)

G_s : 강재 전단탄성계수(MPa)

ν_s : 강재 포아송비

E'_c : 콘크리트의 인장균열을 고려한 탄성계수(MPa), 콘크리트 탄성계수의 70% 사용

다만, 전체 보강 강판콘크리트 실험체(RSC_FR)의 경우 전력산업기술기준의 기준을 적용하되, 모듈화 보강 강판콘크리트 실험체(RSC_MR)의 경우 기준 실험체(BF)의 일부만을 보강한 실험체로 완전합성 구조물로 판단하기 어려워, RSC_MR 실험체는 24 MPa의 압축강도를 갖는 콘크리트 벽체 전단강도^[8]와 무보강 강판의 후좌굴강도 이론^{[9],[10]}을 이용, 두 식의 값을 합산하여 강판콘크리트를 설계하였다.

2.4 실험체 계측 및 가력계획

본 실험에서는 강판콘크리트 보강된 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 수행하기 위해 스트로크(stroke) ±150 mm의 액츄에이터를 통한 변위제어 방식으로 가력계획을 수립하였다. 가력 이력은 Fig. 4와 같이 각 스텝별로 2 cycle씩 0.15 mm/s - 1.0 mm/s의 속도로 반복가력하였으며, 층간변위 0.25% - 10%까지 가력범위를 계획하였다^[11].

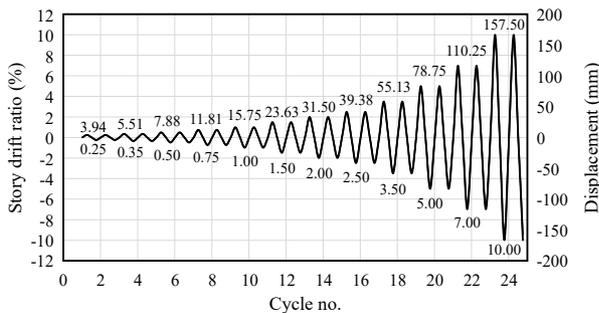


Fig. 4. Loading protocol

강판콘크리트 보강된 두 실험체의 경우, 실험체의 면외 방향으로의 변형을 방지하기 위하여 가이드 프레임을 설치하였다. 철근콘크리트 구조물 내 주근의 변형율을 측정하기 위하여 보-기둥 단부 내·외부 주근에 소성 스트레인게이지를 부착하였고, 강판콘크리트의 변형을 측정하기 위해 강판콘크리트 정면 단부와 중앙에 3축 스트레인게이지를 부착하였다. 또한 RSC_MR 실험체의 경우 강판콘크리트 측면 상·하단부에 소성 스트레인게이지를 추가로 부착하였다. 철근콘크리트 구조물의 균열 양상을 파악하기 위하여 흰색 페인트를 도포하였고, 강판콘크리트 외측 강판의 좌굴 및 변형을 보다 쉽게 관찰하기 위해 강판 외측면에 석회칠(white-washed)을 실시하였다. Figs. 5-6에 강판콘크리트 시스템으로 보강된 실험체의 설치계획도 및 설치상태를 나타내었다.

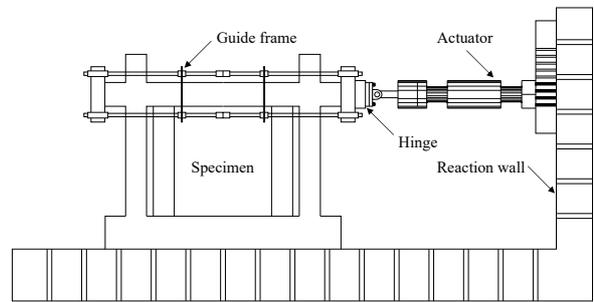


Fig. 5. Test set-up plan



(a) RSC_FR



(b) RSC_MR

Fig. 6. Test set-up of specimens

2.5 재료시험 결과

각 실험체 제작에 사용된 콘크리트에 대한 재료시험을 하고 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 기준 구조물(BF) 및 강판 콘크리트에 사용된 콘크리트의 설계강도(f_{ck})는 모두 24 MPa로 배합설계하였다.

Table 2. Material test results

Specimen	Design strength f_{ck} (MPa)	Experimental strength f_{cu} (MPa)
C-1	24	27.9
C-2	24	26.5
C-3	24	23.4
C-4	24	28.3
C-5	24	26.3
Average	24	26.5

콘크리트의 압축강도 시험은 ‘KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법’에 의거 원주형 100 mm × 200 mm의 공시체를 제작하였으며, ‘KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법’의 규정에 따라 평가하였다^{[12],[13]}. 시험 결과 공시체 총 5개의 압축강도 평균값은 26.5 MPa로 나타났다.

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 건축물에 강판콘크리트 시스템을 적용한 내진보강 성능을 분석하기 위해 강판콘크리트 시스템으로 보강한 실험체들에 대한 반복가력 실험을 수행하였다. 각 보강 실험체에 대한 균열 및 파괴양상, 하중-변위 관계, 층간변위 별 유효강성 및 에너지 소산능력 등을 평가하여 기 실시된 기준 실험체(BF) 대비 내진성능 향상 여부를 비교·분석하였다.

3.1 균열 및 파괴양상

Fig. 7에는 각 실험체별로 균열 측정이 어려울 정도로 콘크리트의 박리가 심화되었던 층간변위 직전까지의 균열을 도식화한 도면과 실험 종료 후의 모습을 나타내었다.

먼저 Ha *et al.*^[1]에 의해 기 수행된 기존 철근콘크리트 구조물 실험체(BF)의 경우, 층간변위 0.75%에서 항복한 후 기둥의 양 끝단에서 균열이 시작되어 점차 보-기둥 접합부로 확대되었다. 이후 균열 폭이 심화되면서 층간변위 5.0%에서 콘크리트가 박리되기 시작했고, 층간변위 7.0%에서 기둥 단부의 콘크리트 박리 심화로 첫 번째 사이클 가력 후 실험을 종료하였다.

기존 실험체(BF) 내부 전체를 강판콘크리트로 내진 보강한 실험체(RSC_FR)는 층간변위 0.5%에서 양 기둥 상단부

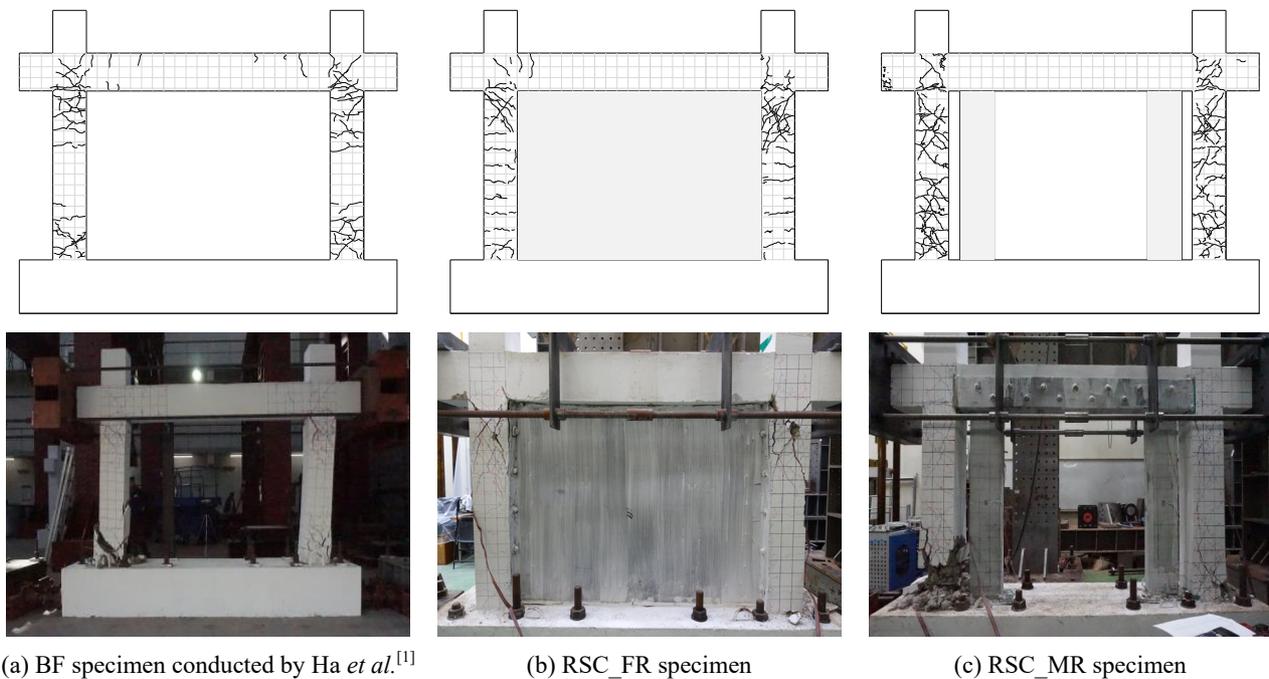


Fig. 7. Crack and fracture of specimens

에서 미세한 균열이 나타나고 강판 양쪽 상단부에서 좌굴이 발생하였다. 이후 층간변위 0.75%에서 강판의 면외 좌굴이 심화되면서 항복하였고 강판과 철근콘크리트 기초판 사이에 폭시의 들뜸 현상이 관측되었다. 층간변위 1.0%에서 양 기둥 상단부에 사인장 균열이 발생하기 시작하면서 하중이 감소하였고, 균열은 점차 확대되어 층간변위 2.0%에서 기둥 콘크리트의 박리가 심화되어 층간변위 2.5%까지 가력한 후 실험을 종료하였다. Fig. 8에 RSC_FR 실험체의 강판 좌굴 형상을 나타내었다.

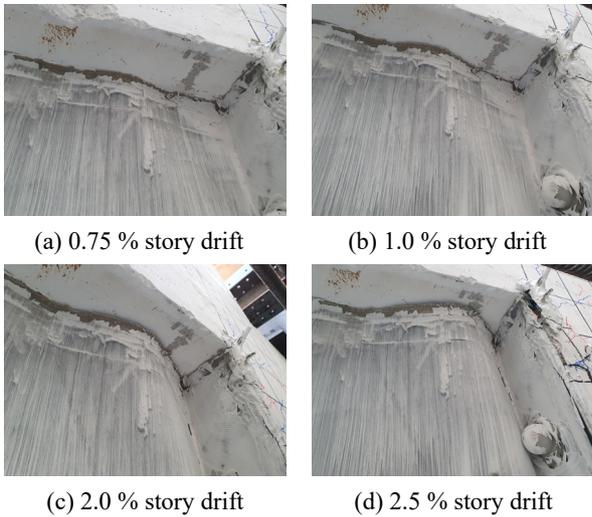


Fig. 8. Steel plate buckling of RSC_FR specimen

모듈화 강판콘크리트 시스템으로 내진 보강한 실험체 (RSC_MR)는 층간변위 0.35%부터 미세한 초기균열이 발생되었고 이후 기둥 양 끝단에서 균열이 확대되었다. 그리고 강판콘크리트에 의한 기초판에 작용하는 전단력에 저항하고자 도입한 기초판의 강판이 들뜨기 시작하여 층간변위 2.5%에서부터는 기초판과 기둥에 보강한 강판이 분리되었지만, 강판콘크리트에 특이한 변화는 관찰되지 않았다. 또한, 기본 골조 보 부재에 강판을 보강하여 보 부재의 큰 균열은 관찰되지 않았다. 층간변위 5.0%에서 기둥의 콘크리

트가 박리되면서 하중이 감소하였고, 점차 확대되어 층간변위 7.0%에서 기둥의 콘크리트 박리가 심화되어 층간변위 10.0% 1 cycle까지 가력 후 실험을 종료하였다.

3.2 하중-변위 관계

Table 3에는 기존 실험체(BF)와 강판콘크리트 시스템으로 보강한 실험체들(RSC_FR 및 RSC_MR)의 실험 결과를 바탕으로 최대하중(P_{max}), 최대변위(δ_{max}) 및 등가에너지법을 이용하여 산정한 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y), 초기강성(K_y)을 정리하였고, Fig. 9에 각 실험체의 하중-변위 곡선 그래프를 나타내었다.

기 실시된 기존 철근콘크리트 실험체(BF)의 경우 최대하중은 정가력 및 부가력 시 층간변위 5.0%에서 각각 185 kN, 164 kN이 측정되었고, 초기강성은 정가력 및 부가력에서 각각 16.9 kN/mm, 15.63 kN/mm로 나타났다. 최대하중에 도달할 때까지는 점진적으로 강도가 증가하다가 기둥 하부 콘크리트의 박리와 균열이 심화되었던 층간변위 5.0% 이후에는 하중이 감소하기 시작하였다.

기존 실험체(BF)를 강판콘크리트로 전체 보강한 실험체 (RSC_FR)의 경우, 최대하중은 정가력 시 층간변위 0.75%에서 540 kN, 부가력 시 층간변위 1.5%에서 527 kN으로 나타났다 초기강성은 정가력 및 부가력에서 각각 63.17 kN/mm, 52.69 kN/mm가 측정되었다. 기존 실험체(BF) 대비 약 3배의 강도증진 효과가 있었으나, 보강강판의 좌굴이 발생한 층간변위 0.75%부터 하중이 급격히 감소, 콘크리트 박리가 심화되었다. 강성 또한 크게 증가하여 오히려 콘크리트의 급격한 균열 및 파괴를 유발한 것으로 보인다. 또한 기존 실험체 (BF)와는 다르게 기둥 상부에서 사인장 균열이 심화되었는데, 이는 강판콘크리트 제작 시 강판 사이에 콘크리트를 타설하고 양생하는 과정에서 재료분리로 인해 밀실하게 콘크리트가 충전되어 보강된 하부보다 상부 쪽이 상대적으로 보강에 의한 구속효과가 낮아서 발생한 현상으로 판단된다.

Table 3. Test results of specimens

Specimen	Positive (+)					Negative (-)				
	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K_y (kN/mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K_y (kN/mm)
BF	185.46	110.21	171.88	10.17	16.90	168.02	110.50	156.57	10.02	15.63
RSC_FR	539.15	11.13	433.33	6.86	63.17	527.45	19.66	421.50	8.00	52.69
RSC_MR	270.10	78.80	254.20	18.60	13.67	247.8	78.7	227.10	18.90	12.02

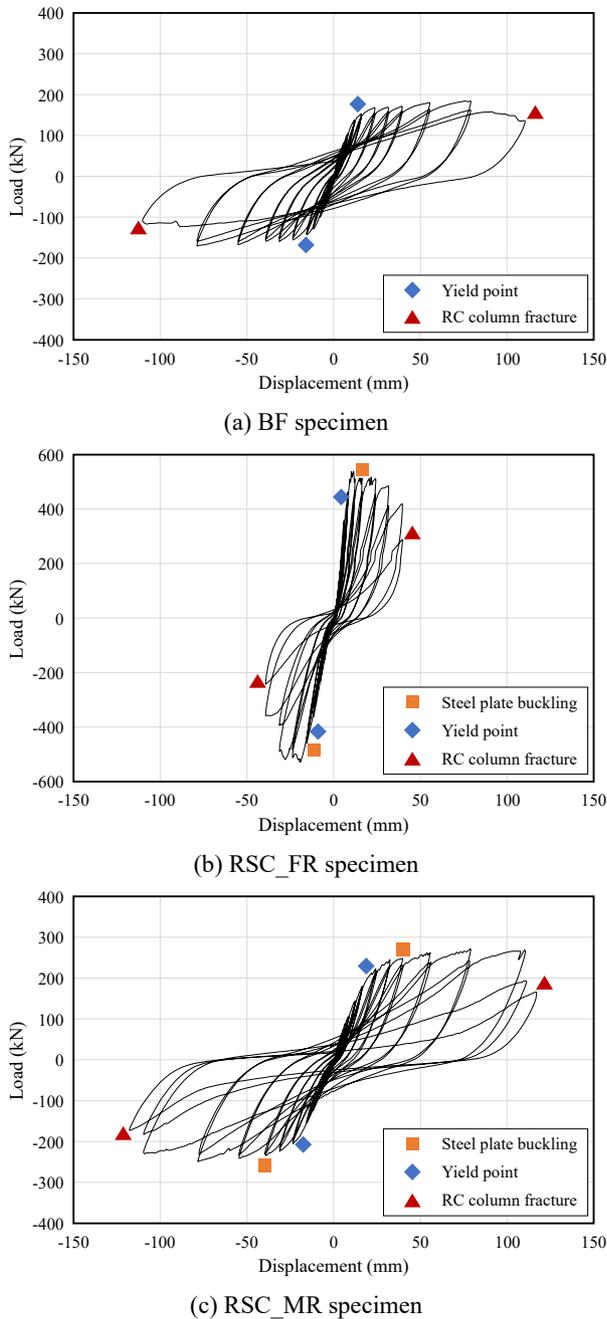


Fig. 9. Load-displacement relationship of specimens

모듈화 강판콘크리트 시스템을 적용한 실험체(RSC_MR)의 경우 최대하중은 정가력 및 부가력 시 층간변위 5.0%에서 각 270 kN, 248 kN으로 측정되어 기준 실험체(BF) 대비 약 1.5배의 강도 증진 효과를 나타냈으며, 초기강성은 정방향에서 13.7 kN/mm, 부방향에서 12.0 kN/mm로 측정되었다.

각 실험체별 비교분석을 위해 하중-변위 곡선의 포락곡선(envelop curve)을 Fig. 10에 나타내었다. 전체보강 실험체(RSC_FR)의 경우 기준 실험체(BF) 대비 높은 초기 강도증

진 효과를 나타내었으나 강성 또한 크게 증가하여 콘크리트의 급격한 파괴를 야기한 것으로 판단된다. 모듈러 보강 실험체(RSC_MR)는 층간변위 0.75%까지는 기준 실험체(BF)와 큰 강도 차이를 보이지 않으나, 기준 실험체(BF)의 항복 시점 이후인 층간변위 1.0%부터는 서서히 강도증진 효과를 나타내었다.

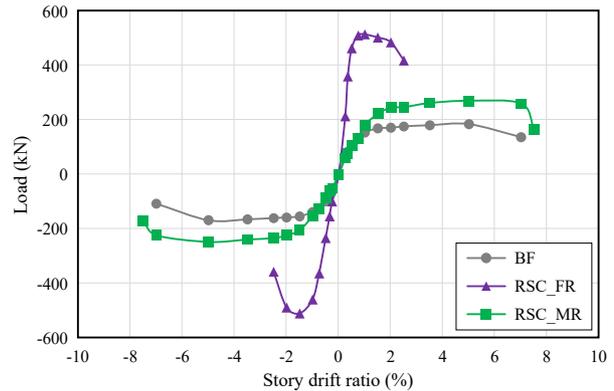


Fig. 10. Envelop curves of specimen

3.3 유효강성 비교

각 실험체의 층간변위 별 유효강성을 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 기 수행된 기존 철근콘크리트 실험체(BF)의 초기강성은 16.9 kN/mm, 강판콘크리트로 보강한 두 실험체의 초기강성은 전체 보강 실험체(RSC_FR)가 63.2 kN/mm, 모듈화 보강 실험체(RSC_MR)가 13.7 kN/mm로 측정되었다.

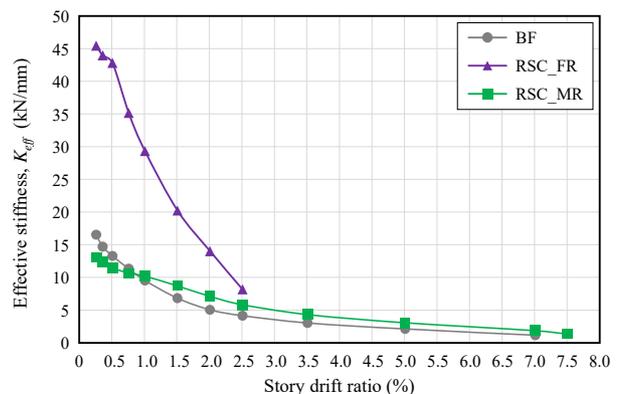


Fig. 11. Effective stiffness of specimens

먼저 강판콘크리트로 전체 보강한 실험체(RSC_FR)의 경우 기준 실험체(BF) 대비 약 2.4배의 초기강성 증진 효과가 있었으나, 앞서 언급한 바와 같이 높은 강성으로 인해 주변 콘크리트 구조물의 급격한 균열 파괴를 유발하여 강성이 급

격히 저하하였다. 또한 층간변위에 따라 강성 저하가 다른 두 실험체 대비 급격하다는 것을 알 수 있는데, 특히 층간변위 0.5% - 0.75%에서 강판이 좌굴되어 항복되면서부터 강성저하가 심화되었다.

모듈화 강판콘크리트 보강 실험체(RSC_MR)의 경우 초기강성은 기준 실험체(BF)보다 낮게 평가되었지만, 층간변위 0.75% 이후 강성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기준 실험체가 층간변위 0.75% 이후 항복하여 강성저하가 급격했던 것에 반해, RSC_MR 실험체의 경우 강판콘크리트 보강체가 골조의 항복 시점을 늦춰 강성저하에 영향을 끼친 것으로 판단된다. 또한, 모듈화 보강 실험체(RSC_MR)가 기준 실험체(BF)보다 강성 저하가 더 완만한 것을 확인할 수 있다.

3.4 에너지 소산능력

각 실험체의 누적 에너지 소산량을 Fig. 12에 나타내었다. 에너지 소산능력(energy dissipation capacity)은 지진과 같은 횡하중이 구조물에 가해졌을 때 구조물에서 해당 에너지를 흡수할 수 있는 정도를 말하며, 하중-변위 그래프 곡선에 둘러싸인 면적으로 측정할 수 있다^[4].

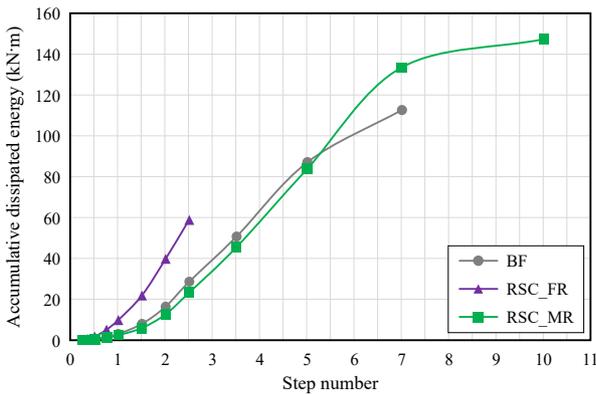


Fig. 12. Cumulative energy dissipation capacity of specimens

먼저 각 실험체의 누적된 에너지 소산량은 기준 실험체(BF)의 경우 약 112.78 kN·m, 전체 보강 강판콘크리트 실험체(RSC_FR)는 약 59.1 kN·m, 그리고 모듈러 강판콘크리트 실험체(RSC_MR)는 약 147.4 kN·m로 나타났다. RSC_FR의 경우 초반 콘크리트의 균열 심화로 다른 두 실험체에 비해 누적 에너지 소산량은 낮게 평가되었다. 모듈화 보강 실험체(RSC_MR)와 기준 실험체(BF)의 에너지 소산능력은 하

중 감소가 발생하는 층간변위 5.0%까지 비슷하다가 이후 RSC_MR 실험체의 에너지 소산능력이 기준 실험체에 비해 높게 나타났다. 이는 층간변위 5.0% 이후로 강판콘크리트 보강체가 에너지 소산능력에 기여한 것으로 판단된다.

3.5 강도 검토

강판콘크리트 보강 실험체(RSC_FR 및 RSC_MR)의 반복가력 실험결과를 설계기준 이론값과 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 2.2절에서 서술한 바와 같이, 전체 보강 강판콘크리트 실험체(RSC_FR)는 전력산업기술기준의 비보강 강판콘크리트 면내전단강도 식을 이용하여 강도를 산출하였고, 모듈화 강판콘크리트 실험체(RSC_MR)는 무보강 강판의 후좌굴강도 이론을 바탕으로 산출한 강판의 강도에 콘크리트 전단강도를 합산하여 산정하였다. 이렇게 산출한 강판콘크리트의 강도를 Ha *et al.*^[1]에 의해 기 연구된 기준 실험체(BF)의 최대강도($P_{max} \approx 185$ kN)와 합산하여 강판콘크리트가 보강된 각 실험체의 총 전단강도를 산출하였다.

Table 4. Shear strength of specimens

Specimen	Design shear strength (kN)	Experimental shear strength (kN)
RSC_FR	1,397	540
RSC_MR	417	270

설계식에 의한 이론값과 실제 실험결과값을 비교한 결과, 전체 보강 강판콘크리트 실험체(RSC_FR)는 이론값 대비 38%, 모듈화 강판콘크리트 실험체(RSC_MR)의 경우 이론값의 65%의 수준으로 나타났다. 특히 RSC_FR 실험체의 경우 설계기준에 의한 이론값이 실제 실험결과보다 훨씬 높게 산출되었는데, 이는 본 연구에 사용된 실험체의 규모적 한계에서 비롯된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실험 여건 등을 고려하여 일반적인 구조물 크기의 약 1/2로 모사된 실험체를 계획하였고, 이를 위해 강판콘크리트 보강재 설계 시 강판 및 콘크리트 두께를 극단적으로 최소화한 점이 실제 강도 발현에 영향을 끼친 것으로 판단된다. 다만 Cho *et al.*^[4] 및 Kim and Lee^[15] 등의 선행 실험연구에서도 공통적으로 실험결과가 전력산업기술기준의 면내전단강도 설계식 값에 못 미치는 결과가 보고되고 있어 이에 대해서는 향후 추가적인 연구와 더불어 전력산업기술기준의 보완이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 골조에 강판콘크리트 시스템을 적용하여 철근콘크리트골조의 내진성능평가가 수행되었다. 실험결과를 토대로 구조물의 거동·파괴 형태 및 하중-변위 관계, 유효강성 및 에너지 소산능력 등 구조물의 내진보강 효과를 확인하고, 현행 설계기준과 실제 실험값을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기존 철근콘크리트 구조물을 강판콘크리트로 보강한 실험체의 내진성능 평가 결과, 기준 실험체(BF) 대비 전체 보강 실험체(RSC_FR)은 약 3배, 모듈러 보강 실험체(RSC_MR)은 약 1.5배의 강도 증진 효과가 나타났다.
- (2) 전체 보강 실험체(RSC_FR)는 기준 실험체(BF) 대비 약 2.4배의 강성 증진 효과가 있었으나, 지나친 초반 강성 증대로 인해 주변 콘크리트 기둥의 급격한 사인장 균열을 유발하여 층간변위에 따른 강도 및 강성 저하가 심화되었다.
- (3) 모듈화 강판콘크리트 보강 실험체(RSC_MR)의 경우, 층간변위 1.0 %까지의 초기 강성은 기준 실험체(BF) 대비 낮게 평가되었지만, 높은 연성능력으로 인하여 강성 저하가 완만하고 항복 시점 이후로는 기준 실험체보다 약 1.2배 - 1.5배 높은 강성을 확보하여 내진보강 방법으로 보다 적합한 것으로 판단된다.
- (4) 에너지 소산능력 평가 결과, 모듈화 보강 실험체(RSC_MR)가 기준 실험체(BF)보다 총 에너지 소산량이 약 1.3배 높게 나타났다. 이는 강판콘크리트가 기존 철근콘크리트 골조의 에너지 소산능력에 기여한 것으로 사료된다.
- (5) 현행 강판콘크리트 면내전단강도 설계기준 대비 실제 실험 결과치는 약 38 %로 나타났는데, 이는 본 연구에 사용된 실험체 크기가 제한된 점이 작용된 것으로 판단된다. 다만 기존 선행된 타 연구에서도 실제 실험 강도가 설계기준에 미치지 못한 경우가 보고되고 있어, 이는 향후 추가적인 연구 및 설계기준의 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구

재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018 R1D1A1B07048211).

참고문헌(References)

- [1] Ha, H., Oh, K., and Lee, K. (2018) Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frames Reinforced with Chevron Bracing System, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.22, No.1, pp.13-22 (in Korean).
- [2] Lee, S.-J., and Kim, W.-K. (2010) Damping Ratios for Seismic Design of SC Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.487-496 (in Korean).
- [3] Jang, D., Youn, D.-A., Lim, S.-H., Jang, A.-Y., and Lee, K. (2019) Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frames Reinforced with Steel Plate Concrete, *Proceedings of Annual Conference of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.23, No.1, pp.193-194 (in Korean).
- [4] Cho, S.G., So, G.H., Kim, D., and Kwon, M.-H. (2012) Experimental Investigation of the Lateral Load Capacity and Strength Characteristics of a Steel Plate Concrete (SC) Shear Wall, *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.16, No.5, pp.23-32 (in Korean).
- [5] Lee, K.-J., Hwang, K.-M., Hahm, K.-W., and Kim, W.-B. (2012) An Experimental Study on Flexural/Shear Load Properties of SC(Steel Plate Concrete) Structure with Reinforced Concrete Joint, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.2, pp.137-147 (in Korean).
- [6] Hwang, K.M., Lee, K.J., Hahm, K.W., and Kim, W.K. (2013) A Study on Out-of-Plane Flexural Behavior of the Structure with a Vertical Plane Connection Between a Reinforced Concrete Wall and a Steel Plate Concrete Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.93-102 (in Korean).
- [7] Korea Electric Association (2016) *Korea Electric Power Industry Code* (2015 Ed.), SNG Steel-Plate Concrete Structure, Korea (in Korean).
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021) *Reinforced Concrete Structure Design Standard* (KDS 14 20 00: 2021), Korea (in Korean).
- [9] Canadian Standards Association (2001) *Limit States*

- Design of Steel Structures* (CAN/CSA S16-01), Canada.
- [10] Choi, I.-R. (2009) *Seismic Behavior and Design of Steel Plate Walls with Thin Infill Plates*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- [11] Kim, C., Yu, E., and Kim, M. (2016) Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Masonry Infilled Frames with Different Masonry Wall Thickness Subjected to In-Plane Loading, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.29, No.1, pp.85-93 (in Korean).
- [12] Korean Agency for Technology and Standards (2010) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete* (KS F 2405: 2010), Korea (in Korean).
- [13] Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens* (KS F 2403: 2014), Korea (in Korean).
- [14] Park, B., and Kwon K. (2017) Development of External Reinforcement Method for Improvement on Seismic Performance of Masonry Infilled Wall, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.17, No.3, pp.11-19 (in Korean).
- [15] Kim, K.-S., and Lee, K.-J. (2011) In-Plane Shear Capacity of RC(Reinforced Concrete)-SC(Steel Plate Concrete) Wall I Type Connection, *Proceedings of the Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.31, No.2, pp.177-178 (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 필로티 구조와 같이 지진하중에 취약한 기존 철근콘크리트 구조물에 강판콘크리트 시스템을 보강하여 내진 성능을 확보하기 위한 실험연구를 수행하였다. 이를 위해 비보강 철근콘크리트 구조물에 형태가 다른 두 종류의 강판콘크리트를 설치한 실험체를 제작하여 내진 성능을 평가하기 위한 정적 가력 실험을 수행하였다. 실험 결과, 철근콘크리트 구조물 전체를 강판콘크리트로 보강한 실험체의 경우 높은 강도 및 강성이 발휘되었으나, 지나친 강성 증대로 인하여 철근콘크리트 구조물의 급격한 균열 및 파괴를 야기했다. 모듈화 강판콘크리트 부재로 보강한 실험체는 강도 및 연성이 증진되었으며, 특히 높은 연성능력을 바탕으로 강판의 항복 시점 이후 강성 및 에너지 소산능력에서 보다 뛰어난 성능을 나타내었다. 따라서 강판콘크리트를 기존 철근콘크리트 건축물의 보강재로서 활용한다면 충분한 내진보강 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 강판콘크리트, 철근콘크리트, 내진보강, 내진성능평가, 모듈화
