



중·저층 철근콘크리트 건물의 SRCF 외부접합 내진보강공법의 내진성능 평가

이강석^{1)*} · 정주성¹⁾ · 이종권²⁾

¹⁾ 전남대학교 건축공학과 ²⁾ 씨티에스 주식회사

Seismic Performance Evaluation of Seismic Strengthening Method using SRCF External Connection of Medium and Low-rise R/C Buildings

Kang-Seok Lee,^{1)*} Jue-Seong Jung,¹⁾ and Jong-Kweon Lee²⁾

¹⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwang-Ju 500-757, Korea

²⁾CTS Engineering Ltd., Seoul 138-859, Korea

ABSTRACT A new SRCF (Steel Reinforced Concrete Frame) external connection method for seismic strengthening of medium- and low-rise reinforced concrete buildings is reported in this paper. The SRCF method, proposed in this study, is capable of carrying out the seismic retrofitting construction while residents can live inside building. The method is one of the strength design approach by retrofit which can easily increase the ultimate lateral load capacity of concrete buildings controlled by shear. The pseudo-dynamic test, designed using an existing school building in Korea, was carried out in order to verify the seismic strengthening effects of the proposed method in terms of the maximum load carrying capacity and deformation. Test results revealed that the proposed SRCF strengthening method installed in RC frame enhanced conspicuously the strength and deformation capacities, and the method can resist markedly under the large scaled earthquake intensity level.

Keywords : SRCF, seismic strengthening, reinforced concrete, pseudo-dynamic test, medium-and low-rise, external connection method

1. 서 론

철근콘크리트(이하, RC) 건물이 소요의 사용기간 중 유효하게 사용되고, 그 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 항상 건물의 안전성을 검토하여야 하며, 노화나 파손 부위가 발생할 경우에는 보수 및 보강 등을 실시하여 안전성을 확보해야 한다. 특히, 최근 들어 기후변화에 따른 지진발생 빈도가 일본, 아이티, 중국 등을 비롯하여 전 세계적으로 증가하고 있으며, 국내에서도 기상청 통계자료¹⁾에 의하면 지난 31년간 총 816회의 지진이 관측되었으며, 그 중에서 규모 2이상의 지진은 1980년대에는 평균 15.6회 발생을 하였지만, 2000년대에는 평균 44.9로서 20년 사이 약 3배 이상 발생하고 있다는 사실을 고려한다면, 비내진상세를 가지는 기존 중·저층 RC 건축물에 대한 지진 안전성 확보를 위한 대책, 즉 내진보강에 대한 중요성은 기지의 사실이며, 예상되는 지진규모 및 피해

에 따른 내진보강 실시에는 효율적이면서 경제적인 방법에 의하여 이루어져야 한다.

한편, 기존 RC 건물의 내진보강법은 내력(강도)증진법, 변형(연성)능력 향상법, 에너지 흡수능력 개선법 등 수많은 공법들이 제안되어 있다.²⁾ Lee et al.의 연구결과³⁾에 의하면 국내 비내진상세를 가지는 6층 미만의 중·저층 RC 건물의 대다수는 기둥 띠철근 간격이 30 cm로서, 전단파괴가 발생할 가능성이 매우 높은 건물^{4,6)}이며, 또한 극한 수평내력이 매우 부족하여 연성능력을 개선시키는 단독 공법을 이용한 내진보강법은 비효율적이라고 지적하고 있으며, 국내 비내진상세를 가지는 전단파괴형 중·저층 RC 건물의 내진성능 향상에는 강도증진법이 보다 효율적인 내진보강법이며, 거주자가 거주를 하면서 내진보강을 실시할 수 있는 공법, 예를 들어 외측프레임을 이용한 외부접합공법 등이 경제적인 측면에서 타당하다고 기술하고 있다.

그러나 강도 증진형 기존 내진보강법은 주로 골조내부에 끼움전단벽체를 증설하는 방법, 각종 형태의 철골프레임을 골조 내에 신설하는 방법, 철판 패널 등을 골조내에 삽입하는 방법 등의 골조의 내부접합공법이 주류로서, 이러한 기존 내부접합형 내진보강법은 건물의 수평력에

*Corresponding author E-mail : kslnist@jnu.ac.kr

Received September 4, 2014, Revised December 14, 2014,

Accepted March 9, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

대해서 강도를 증진시키는 유효한 방법이다.⁴⁾ 그러나 내부접합공법을 사용하면 건물 내부에서 부가적인 공사범위가 확대되어 보강공사 기간 중에 건물을 사용할 수 없는 공간이 커지며, 또한 보강작업 시 공간확보에 어려움이 발생하는 경우가 있어 이용공간이 제한되어 효율성이 떨어지며, 기존 골조와의 내부접합부 시공 정확성이 요구되는 등 내진보강 공사기간이 장기화 될 가능성이 높다.^{4,7)}

따라서 이러한 단점을 보완하고 극복 할 수 있는 국내 중·저층 RC 건축물의 구조특성에 적합하고 거주자가 거주를 하면서 보강공사가 가능한 새로운 강도증진형 외부접합형 내진보강법의 개발이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 기존 강도증진형 내진보강법의 단점을 보완·개선할 수 있는 새로운 개념의 내진보강법인 SRCF (Steel Reinforced Concrete Frame) 외부접합형 내진보강공법을 제안하였다. SRCF 보강법은 거주자가 거주가 가능하면서 내진보강 공사를 실시할 수가 있으며, 접합부 내력확보 및 시공성이 탁월하며, 특히 필요 내진보강량 산정이 간편한 전형적인 강도저항형 내진보강공법으로 전 단파괴가 지배적인 비내진상세를 가지는 국내 중·저층 RC 건물에는 내력확보가 용이한 내진보강 공법이다.

본 연구에서 제안한 SRCF 외부접합형 공법의 유용성을 검증 할 목적으로 기존 비내진상세를 가지는 중·저층 RC 학교건물의 골조를 대상으로 유사동적실험을 실시하여 내진보강 효과를 검증 및 검토하였다.

2. SRCF 외부접합형 내진보강법 개요

Fig. 1에 나타낸 기존에 널리 사용되고 있는 기존골조와 내진보강 프레임의 외부접합방법인 철근 케미칼 접침이음방식에서는 접합부 콘크리트의 연성능력이 부족하여 지진 발생 시 콘크리트의 균열 발생은 필연적이라 할 수 있으며, 균열 발생으로 인하여 내진보강장치로의 지진하중 전달이 차단되어 기존 구조체와 내진보강장치의 일체 거동을 통한 효과적인 내진보강효과를 기대하기 어렵다.⁷⁾

본 연구에서 제안한 SRCF 외부접합공법은 상기와 같은 기존 철근 케미칼 이음방식이 가지는 단점, 즉 접합부 일체성 확보 문제를 보완 및 개선한 것으로서, Fig. 2에 나타낸 것처럼 SRCF 외부접합법은 기존 구조체(A), 기존

구조체 보강용 강판(B), 보강강판 고정용 앵커(C), SRCF 내진보강용 철골프레임(D), SRCF 접합장치(E), 슬릿플레이트 고정볼트(F), 에폭시 수지(G), 외부 콘크리트 마감

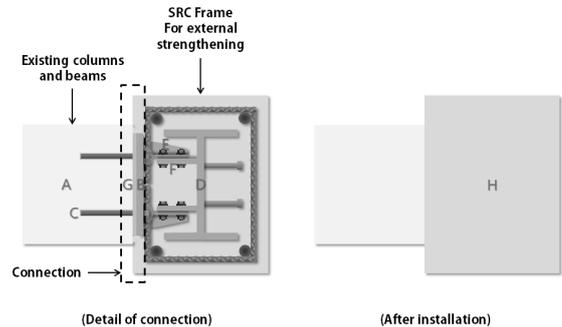


Fig. 2 SRCF external connection method

Table 1 Technical Characteristics of SRCF Method

Sequence	Construction Procedures
1	Boring of connection anchoring hole
2	Installation of anchor plate
3	Tightening of slit plate bolt/Welding of connection device
4	Fixing of anchor plate/Epoxy sealing, injection and filling
5	Installation of rebar and form/ Cast-in-place concrete
6	Finishing process

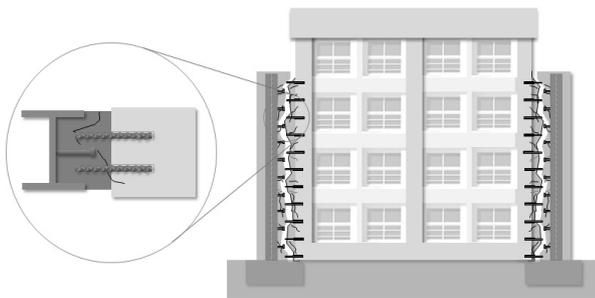


Fig. 1 Drawbacks of existing connection method



Fig. 3 R/C building strengthened with SRCF external connection method

(H)으로 구성되어 있으며, 구조체 보강용 강판(B)은 SRCF 내진보강용 철골프레임(D)에 설치된 SRCF 접합장치(E) 및 슬릿플레이트 고정볼트(F)에 볼트접합 및 용접에 의해서 기존 구조체와 보강재를 일체화 시키는 것이 주요 특징으로서, 시공순서는 Table 1과 같다. Fig. 3에는 SRCF 외부접합공법에 의해서 보강된 최종 시공 상태의 이미지를 나타낸다.

3. 사용재료 및 실험체 개요

3.1 사용재료 및 특성

유사동적실험에 사용된 실험체의 콘크리트 압축강도는 21 MPa로, 3개의 공시체 평균값으로 표준공시체 보정값은 측정된 압축강도의 97%로 28일 평균압축강도 24 MPa를 확인하였다. 사용한 철근은 1종 SD300이며, 부재의 주근은 D16, 전단 보강근은 D10을 사용하였다. 이음 성능 평가 실험체에 사용된 철근의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편)의 ‘라’호의 규정에 따라 철근 인장시험편을 각각 3개씩 제작하여 만능시험기(U.T.M.)을 이용하여 가력속도 5 mm/min로 인장시험을 진행하였다. 시험결과 철근의 항복강도와 인장강도는 D16의 경우 평균 518 MPa, 752 MPa로, D10의 경우 평균 472 MPa, 700 MPa로 나타났다.

3.2 실험체 제작 및 변수

유사동적 실험에 의해서 SRCF 내진보강공법의 내진성능 효과를 검증 할 목적으로 Fig. 4에 나타낸 비내진상세를 가지는 국내 기존 RC 학교건물의 골조(1980년대 다형

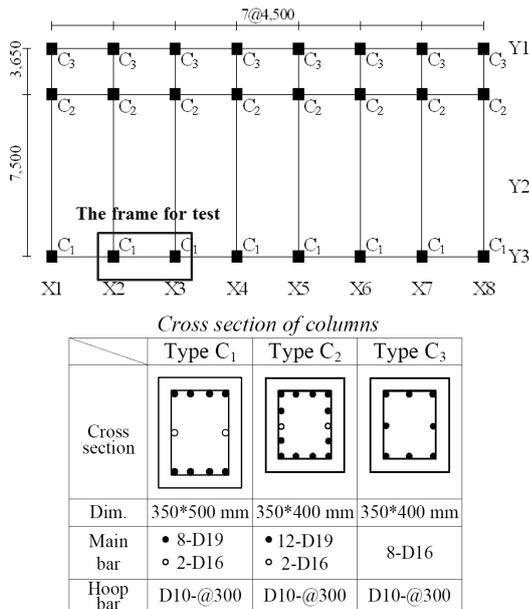


Fig. 4 Planar view of the ground floor (1F) of the investigated building^{2,8)} and the frame for test

표준도면)^{2,8)}를 선정하였으며, 대상 건물의 층고는 330 cm, 설계용 콘크리트 강도는 21 MPa이며, 층수는 3층이다. 실험대상 골조는 Fig. 4 및 Fig. 6의 기둥-보-경두리벽(조적조)으로 구성된 대상학교의 외부 내측골조의 1층 부분이며, 실험체는 실험실의 규모를 고려하여 약 60% 크기로 축소된 1스팬 1층으로써 Fig. 5 및 Fig. 6 (조적조 경두리벽체 시공)에 나타내는 것처럼 SRCF 내진보강법의 내진보강 효과를 유사동적실험을 이용하여 검증하기 위

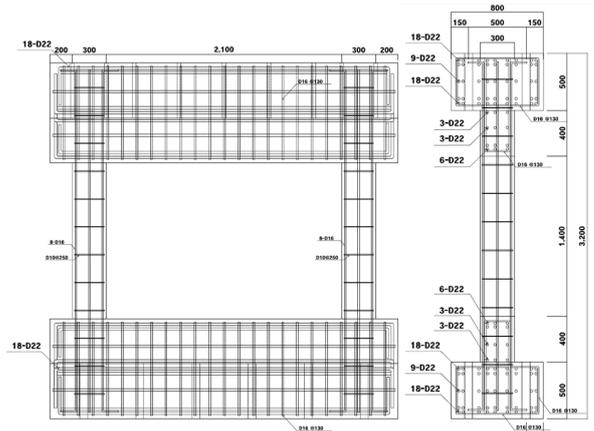


Fig. 5 Detail of the Control Specimen

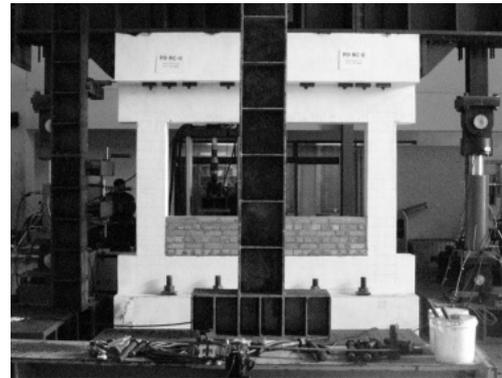


Fig. 6 Configuration of control specimen

Table 2 Summary of the Specimens

Specimens	Test methods	Strengthening types	Earthquake levels for pseudo dynamic test(gal)
C-RC	Cycling load	-	-
PD-RC	Pseudo-dynamic	-	250/300
PD-SRCF	Pseudo-dynamic	SRCF	300/400/500
Notation	C PD ①	- RC ②	① C: Cycling load test PD: Pseudo-dynamic test ② RC: RC frame without strengthening SRCF: RC frame strengthened with SRCF method

하여 유사동적 실험용 비보강 골조실험체 1개 및 후술하는 Fig. 8에 나타난 SRCF 내진보강법으로 보강한 골조실험체 1개를 각각 계획 및 제작하였다. 또한, 유사동적실험의 실험변수 산정 및 복원력특성 파악을 위하여 반복 가력 실험용 비보강 골조실험체 1개를 동시에 제작하였다. 실험체 변수는 3개이며, Table 2에는 각 실험체의 일람을 나타낸다.

기둥 단면은 가로(b)와 세로(D) 300×300 mm인 장방형으로 계획하였으며, 기둥의 주근은 8-D16, 띠근은 D10@250이며, 기둥의 순길이는 1400 mm로 계획하였고, 전단 경간비는 4.7이다. 골조의 보는 내진보강 목적으로 제작하였으며, 상부의 스티브와 일체거동을 하도록 계획하였다. 이것은 본 연구의 대상인 기존 비내진상세를 가지는 국내 학교건물은 기존연구^{3,6)}에 의하면 기둥이 먼저 붕괴메커니즘에 도달하는 기둥붕괴형이라고 사료되기 때문이다.

보 및 스티브의 형상은 강성이 충분히 커서 기둥의 거동에 영향을 주지 않도록 형태를 결정하였고, 실험 시 집중하중에 의한 균열 및 국부 변형이 생기지 않도록 철근 보강을 하였다. 한편, 기존 학교건물의 외부골조에는 일반적으로 조적조 징두리벽체가 시공되어 있다는 사실을 고려하여 본 실험체에서도 Fig. 6에 나타내는 것처럼 조적조 징두리벽체를 시공하였다. 조적조 징두리벽체의 유무에 의한 내진성능 실험에 관한 기존 연구⁹⁾에서 징두리벽체를 가지는 골조는 순수 골조 대비 단주효과에 의해서 취성적인 거동을 나타낸다고 보고하고 있다. 조적조(시멘트벽돌)는 B형, 즉 길이는 190 mm, 나비 90 mm, 두께 57 mm, 압축강도는 8 MPa이며, 실험체에는 60% 축소라는 사실을 고려하여 480 mm 높이로 시공하였다.

3.3 SRCF 접합부의 설계

본 연구에서는 SRCF 외부접합형 접합부 앵커의 종류, 매입깊이, 간격 등을 JBDPA⁴⁾에서 제안한 앵커 설계식을 이용하여 결정하였다. Table 3에는 그 결과를 나타내며, Fig. 7에는 SRCF 내진보강재를 포함한 접합부 앵커의 상세 형상을 나타낸다.

상기 표 및 그림에 의하면 접합부 앵커는 직경(D)이 12

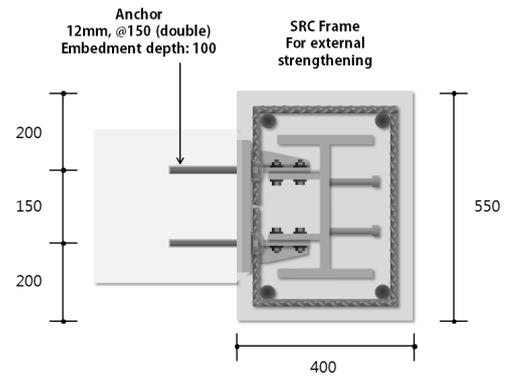


Fig. 7 Connection detail of SRCF Method (for Columns)



(a) Front view (SRCF strengthening) (b) Rear view (Existing frame)

Fig. 8 Planar view of the ground floor (1F) of the investigated building^{2,8)} and the frame for test

mm, 간격은 150 mm (2단배열)이다. 기둥 1개의 총 앵커수는 주두 및 주각 단부(0.2L_c: L_c는 기둥길이) 각 12개, 일반부(0.6L_c) 18개, 총 30개 이며, 보의 앵커수는 38개로 산정되었으며, 기존 골조 포함 SRCF 보강프레임 수평저항능력 대비 접합부 강도는 단부에서 약 3.5배, 일반부에서 1.2배 높아 본 연구에서 개발한 SRCF 보강프레임은 기존 골조와 일체적으로 지진하중에 거동하리라고 사료된다. Fig. 8에는 SRCF 내진보강법으로 보강한 골조실험체의 형상을 각각 나타낸다.

4. 유사동적실험의 개요 및 실험방법

4.1 유사동적실험의 개요

구조물의 비탄성 지진응답을 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 실험방법으로는 진동대실험(shaking table test), 준정적실험(quasi-static test), 그리고 유사동적실험(pseudo-dynamic test) 등으로 분류할 수 있다.¹⁰⁾ 진동대실험은 구조물의 지진에 대한 거동을 알아보기 위해서 가장 효과적인 실험방법이 되겠지만, 진동대의 크기, 용량에 따라서 실험체의 무게와 크기에 대해 크게 제약을 받으므로 대부분 축소모델이 사용되고 있으며, 이에 따라 실제 구조물과의 상사성 문제가 발생하게 된다. 따라서, 이러한 제약조건으로 인해 실험체 크기 구조물의 비탄성 거동을 평가하기 위해서 구조물의 변위 또는 하중으로 제어하는

Table 3 Results of anchor design

Members	Location	N ^c	ΣP ^d (kN)	ΣV _{anchor} ^e (kN)	Safety factor
Beam	0.2L _B ^a	8	23.7	107.5	4.5
	0.6L _B ^a	22	256.2	311.5	1.2
Columns	0.2L _C ^b	6	23.7	80.6	3.4
	0.6L _C ^b	18	208.8	254.8	1.2

^aL_B : Beam length, ^bL_C : Column length

^cN : Number of anchors

^dΣP : The lateral load capacity of a frame

^eΣV_{anchor} : Shear capacity of installed anchors

준정적실험이 많이 사용되고 있다.

한편, 유사동적실험은 진동대 실험과 준정적 실험의 장점을 모아 개발되었다.¹¹⁾ 유사동적실험은 실험과 수치적 해석이 서로 결합되어 실험이 진행되는 복합 실험기법이다. Fig. 9에 나타난 것처럼, 유사동적실험은 컴퓨터에 의한 수치계산 부분과 실험체의 가력실험 부분으로부터 구성되며, 수치계산 부분은 가력 실험 부분에서 측득된 특정 변형에 대한 실험체의 응답량, 입력 지진가속도 및 현 스텝의 응답량에 근거하여 수치적분을 이용하여 운동 방정식을 계산하며, 다음 스텝의 응답변형을 산정한다. 한편, 가력실험은 그 응답변형을 액추에이터 등의 가력 장치에 의하여 실험체에 강제하며 그 때의 변위이력을 측정한다. 이상의 조작을 반복하는 것으로 실험체에 유사적인 지진시의 응답변형을 강제하면서, 컴퓨터에 의하여 지진응답을 계산하여 대상 구조물의 지진응답을 산정한다.

유사동적실험에서 구조물에 제어될 변위가 실험 중에 수치 해석적으로 결정된다는 점을 제외하면 기존의 준정적실험과 거의 유사하며, 보통 수치적인 동적 해석에 의한 지진응답 예측 시에는 이력특성에 대한 수학적 모델 가정이 필요하나, 유사동적실험에서는 이에 관한 정보를 실험체로부터 직접 측정하여 얻음으로서 실제 지진응답과 매우 유사한 효과를 얻을 수 있다.

4.2 유사동적실험 시스템 및 방법

Fig. 9에는 본 연구에서 구축한 유사동적실험 시스템의 개요를 나타낸 것으로서, 제어용 컴퓨터에 의한 입력지진동에 따른 수치계산 부분과 실험체의 가력실험 부분으로 구성된다. 제어용 컴퓨터에 의한 수치계산 부분은 MTS 사 제공 Pseudo-dynamic Testing Program¹²⁾을 이용하였으며, 가력실험 부분에서 LVDT에 의하여 측득된 변형에

대한 실험체의 복원력, 입력 지진가속도 및 현 스텝의 응답량에 근거하여 수치적분을 이용하여 운동방정식을 계산한다. 운동방정식의 수치적분에는 α -method¹²⁾를 이용하였으며, 후술하는 반복가력 실험결과에 근거하여 설정된 초기강성, 감쇠계수 및 질량 등에 근거하여 다음 스텝의 응답변형을 산정한다.

한편, 수평용 지진응답변형은 2000 kN 유압식 MTS 액추에이터에 의하여 실험체에 강제하며, 축력은 실제 기존 골조(기둥 2개)에 가해지는 축하중, 즉 438 kN을 배분하여 각각의 기둥에 219 kN을 실험체 양쪽에 설치된 1000kN 유압식 Actuator를 이용하여 일정하게 가력 하였다. 지진동의 크기는 KBC 구조기준에 의해서 국내에서 발생 가능한 수준인 250 gal 및 300 gal을 기본으로 설정하였으며, 대지진 시의 SRCF 내진보강법의 효과를 비교하기 위하여 400 gal 및 500 gal의 지반가속도도 또한 설정하였다.

입력지진파는 건축구조물의 내진성능을 검증하기 위하여 널리 사용되고 있는 El Centro (NS) 지진파($A_{max} = 340$ gal)을 사용하였으며, 상기에서 설정한 지진동, 즉 250, 300, 400 및 500 gal의 지반가속도 크기에 맞게 El Centro (NS)지진파를 표준화하여 유사동적실험을 실시하였다.

한편, 유사동적실험의 실험변수 산정 및 복원력특성 파악을 위하여 반복가력실험을 실시한 비보강 골조실험체, 즉 C-RC에는 역대칭 모멘트가 발생하도록 횡력을 가하는 액추에이터의 가력점을 실험체의 상부 가력용 철골빔의 중심에 일치시켰으며, 횡 변위는 수평 부재각(R)에 따라 1/2500, 1/1000, 1/500, 1/400, 1/300, 1/250, 1/200, 1/150, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/20, 1/15, 1/10의 순서로 각 3 cycle씩 단계별로 점증 가력 하였다.

5. 실험 결과 및 분석

반복가력 실험용 비보강 골조실험체(C-RC)를 포함한 비보강 유사동적 실험체(PD-RC) 및 SRCF 외부접합공법에 의해서 내진보강된 유사동적 실험체(PD-SRCF) 총 3개 실험체의 균열 및 파괴 상황을 각 실험체 별로 나타내었고, 하중-변위 곡선(복원력), 변위의 시간이력곡선, 최대지진응답 등을 분석하여 기존 실험체 PD-RC 대비 SRCF로 내진보강된 실험체(PD-SRCF)의 내진보강 효과를 검토하였다.

5.1 균열 및 파괴양상

5.1.1 C-RC (무보강 반복가력 실험체)

Fig. 10에는 C-RC실험체의 균열 및 최종파괴 상황을 나타낸다. C-RC는 부가력 3 cycle ($R=1/500$) 및 정가력 5 cycle ($R=1/300$)에서 초기 미세 횡균열이 기둥의 상부 및 하부에 발생하였고, 기둥 중앙부에서는 균열이 전혀 발생하지 않았다. 그 후 균열은 점차 기둥중앙부로 확대되었으

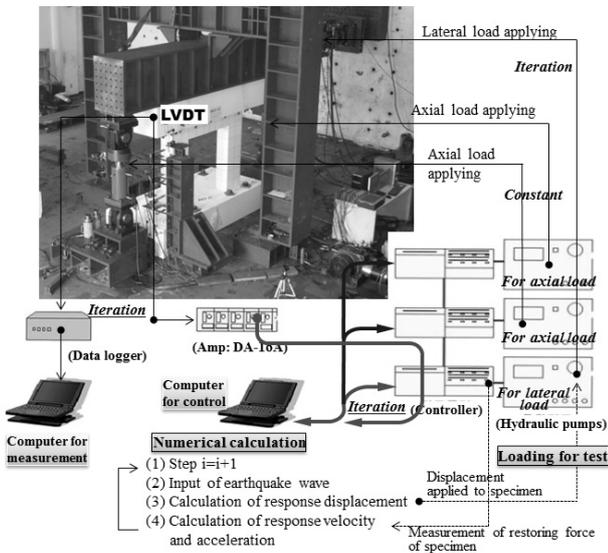


Fig. 9 Pseudo-dynamic test system used in study



Fig. 10 Test result of C-RC specimen



Fig. 12 Test result of PD-SRCF specimen(300gal)



Fig. 11 Test result of PD-RC specimen(300gal)



Fig. 13 Test result of PD-SRCF specimen(400gal)

며, 8 cycle ($R=1/200$)의 정가력에서 기둥 상하부 및 중앙부에 전단균열이 다수 발생하였다.

동일 사이클 부가력 경우도 동일하게 상하부 및 중앙부에 전단균열이 다수 발생하였다. 부재각이 증가 되면서 전단균열 폭이 점점 커지고, 전단 균열 수가 증가되었으며, 폭 3 mm을 넘는 전단균열이 다수 발생하였다. 횡변위가 약 21 mm에 해당하는 10 cycle ($R=1/67$)에서 기둥 양단부에 전단균열의 폭이 매우 커지면서 콘크리트 피복이 박리되었으며, 전단파괴가 최종적으로 발생하였다.

5.1.2 PD-RC (무보강 유사동적 실험체)

무보강 실험체인 PD-RC 실험체는 250 gal의 입력지진동에서 약 1.8초(변위: 5 mm)에서 기둥 상하단부에 미세한 초기 휨균열이 발생하였고, 그 후 2.2초(변위: -7.2 mm)부터는 휨균열이 확장되었으며, 2.5초부터 전단균열이 기둥 상하부에서 발생하기 시작하였다. 이후 전단균열은 점차 증가하였으며, 전단균열은 지진입력 시간이 증가함에 따라 양 기둥 중앙부로 확대되었다. 최대 지진응답은 4.8 초 부근에서 나타났으며, 유사동적실험은 7초까지 진행

되었다.

한편, 300 gal의 입력지진동에 대해서는 약 1.52초부터 육안으로 확실하게 관찰이 가능한 전단균열이 발생하였으며, 1.8초 이후에는 전단균열의 폭이 매우 증대하였다. Fig. 11에 나타난 것처럼, 최대 지진응답을 보여준 5.4초 부근에서 대상골조는 전단 파괴하였다.

5.1.3 PD-SRCF (보강 유사동적 실험체)

SRCF 외부접합공법으로 내진보강 한 실험체인 PD-SRCF는 Fig. 12에 나타난 것처럼 300 gal의 입력지진동에서 약 1.76초(변위: 3.9 mm) 부근에서 기둥 상하단부에 미세한 초기 휨균열이 발생하였으며, 전단균열은 최대 지진응답 변위가 발생한 약 2.54초(변위 : 8.9 mm) 부근에서 발생하기 시작하였으나 균열정도는 미세하였다. 한편, Fig. 13에 나타난 것처럼 400 gal의 입력지진동에 대해서는 2.17 초 이후 전단균열의 수는 300 gal에 비교해서 증가되었지만, 그 규모는 300 gal과 거의 유사하였다. 400 gal의 지진에 대해서도 균열정도는 미세하여 SRCF 내진보강법의 유효성이 검증되었다고 사료된다.



Fig. 14 Test result of PD-SRCF specimen(500gal)

Fig. 14에 나타난 대지진을 상정 한 500 gal의 입력지진동에 대해서는 전단균열의 발생정도가 상기 400 gal보다 크며, 균열폭도 또한 증대하였지만, Fig. 11에 나타난 비보강 PD-RC 실험체와는 대조적으로 중·소규모정도의 균열이 발생하였다.

5.2 최대 지진응답 하중 및 변위

Table 4에는 C-RC(무보강 반복가력 실험체), 입력지진동 250 gal 및 300 gal에 대한 PD-RC 비교용 무보강 유사동적 실험체, 입력지진동 300 gal, 400 gal 및 500 gal에 대한 PD-SRCF 내진보강 유사동적 실험체에 대한 최대 지진응답 하중 및 변위에 대한 실험결과를 파괴모드 및 지진피해규모와 각각 비교하여 나타내었다.

상기 표에 의하며 반복가력실험을 실시한 C-RC 실험체는 정가력에서 최대하중 311 kN(변위 19.5 mm)에 도달하였으며, 부가력 경우와 큰 차이는 없었다. 실험체는 전형적인 전단파괴를 보여주었다. 이는 대상 학교건물이 비내진상세를 가지는 1980년대 건설된 학교건물의 파괴모드를 나타내어 주는 매우 중요한 자료라고 판단된다. PD-RC 실험체, 즉 무보강 비교실험체의 유사동적실험 결과에 의하면 입력지진동 250 gal에서는 305 kN (변위 11.9 mm)의 지진응답 최대값을 나타내었으며, 지진피해 규모는 JBDPA^{4,13)} 및 Maeda et al.¹⁴⁾에 의하면 중규모 지진피해가 발생하였다고 판단된다. 한편, 동일 실험체에 대한 300 gal 입력지진동에서는 최대 지진응답 전단력 308.2 kN (변위 16.7 mm)을 보여주었으며, 최종적으로 최대 지진응답을 나타낸 5.4초 부근에서 대상골조는 전단파괴하였다.

PD-SRCF 내진보강 실험체의 300 gal인 경우는 381.4 kN (변위: 8.9 mm)의 최대 지진응답 전단력을 나타내었으며, 결과적으로 SRCF 외부접합 내진보강공법으로 내진보강 한 실험체는 300 gal의 지진에 대해서는 전술한바 미세한 전단균열정도가 관찰되어 본 연구에서 제안한 SRCF 공법의 내진보강 유효성이 검증되었다고 사료된다. 또한,

Table 4 Comparison of response strength, response displacement and earthquake damage degree

Specimen	EQ ^a (gal)	V _u ^b [kN]	δ _u ^c [mm]	EDD ^d [Failure mode at ultimate state]
C-RC	-	311.0	19.5	- [Shear failure]
PD-RC	250	305.0	11.9	Moderate [Shear crack]
	300	308.2	16.7	Collapse [Shear collapse]
PD-SRCF	300	381.4	8.9	Slight [Shear crack]
	400	435.4	23.4	Slight [Shear crack]
	500	493.5	30.3	Light [Shear crack]

^aEarthquake intensity levels inputted in test

^bMaximin response shear strength

^cResponse displacement at maximum point

^dEarthquake damage degree estimated based on the research results of JBDPA^{4,13)} and Maeda et al.¹⁴⁾

435.4 kN (변위: 23.4 mm)의 최대 지진응답을 나타낸 400 gal의 경우도 300 gal과 거의 유사한 피해정도를 나타내었다. 한편, 대지진을 상정한 500 gal의 입력지진동에서는 493.5 kN (30.3 mm)의 최대 지진응답 전단력을 보여주었으며, 기존 비내진 상세를 가지는 철근콘크리트 국내 학교건물을 대상으로 SRCF 외부접합 내진보강방법으로 보강한 실험체인 PD-SRCF는 JBDPA^{4,13)} 및 Maeda et al.¹⁴⁾에 의하면, 약 500 gal의 지진동에서 소규모정도의 지진피해라고 사료된다.

5.3 하중-변위관계 및 최대 지진응답 결과 상호 비교·분석

Fig. 15에는 C-RC(무보강 반복가력실험)의 하중-변위 포락곡선, 300 gal에 대한 PD-RC 비교용 무보강 유사동적 실험체의 하중-변위 곡선 및 300 gal, 400 gal 및 500 gal에 대한 PD-SRCF 내진보강 실험체 하중-변위 곡선을 각각 비교하여 나타내었다. Fig. 16에는 반복가력 실험체(C-RC)를 제외한 PD-RC 비교용 무보강 유사동적 실험체(300 gal) 및 PD-SRCF 내진보강 유사동적 실험체(300 gal, 400 gal 및 500 gal)에 대한 지진응답 변위-시간이력 곡선을 상호 비교하여 나타내었다. 또한, Table 5에는 본 연구에서 제안한 SRCF 내진보강 실험체와 기준실험체의 300 gal 실험결과 가운데 내진성능 평가에 주요한 요인인 강도비 및 변위비를 비교하여 각각 나타내었다.

상기 그림 및 표에 의하면, 기준실험체 대비 SRCF 외부접합형 내진보강법은 300 gal의 입력지진동에서 약 1.24배, 400 gal의 입력지진동에서는 1.41배, 500 gal의 입력지진동에서는 1.6배 정도 지진응답 내력이 증가하여 내진

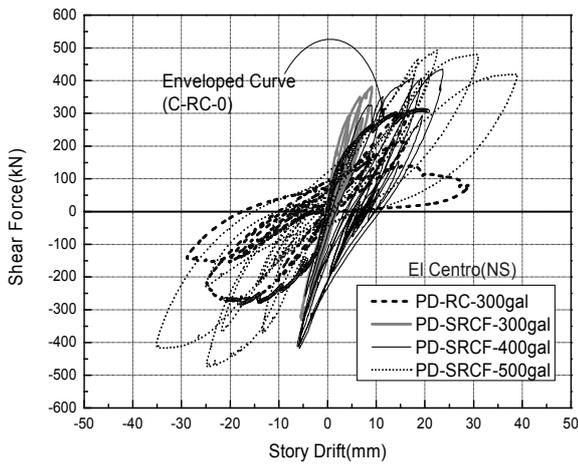


Fig. 15 Comparison of response shear force-story drift relations

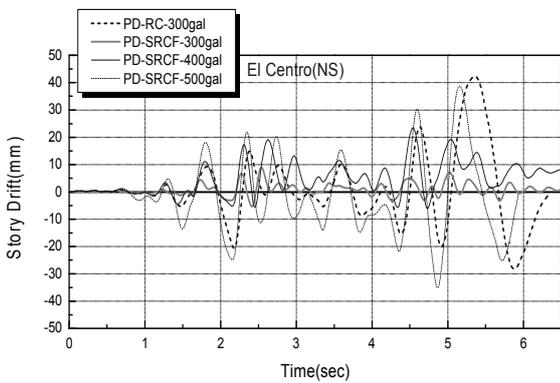


Fig. 16 Comparison of response story drift-time relations

Table 5 Comparison of ratios of response strength and displacement

Specimen	EQ ^a (gal)	Earthquake response strength		Earthquake response displacement	
		Vu ^b [kN]	Rs ^c	δu ^d [mm]	Rd ^e
PD-RC	300	308.2	1.00 (308/308)	16.7	1.00 (16.7/16.7)
	300	381.4	1.24 (381/308)	8.9	0.53 (8.9/16.7)
PD-SRCF	400	435.4	1.41 (435/308)	23.4	1.40 (23.4/16.7)
	500	493.5	1.60 (494/308)	30.3	1.81 (30.3/16.7)

^aEarthquake intensity levels inputted in test

^bMaximin response strength.

^cRatios of maximum response shear strength between the strengthened and control specimens in terms of earthquake intensities.

^dResponse displacement at maximum point.

^eRatios of response displacement between the strengthened and control specimens in terms of earthquake intensities.

보강 효과는 탁월하다고 사료된다. 이러한 결과는 최종 파괴상황을 비교한 Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14에도 잘 반영을 하고 있다. 300 gal에 대한 변위 응답비는 약 0.53

배, 400 gal에 대해서는 1.4배, 500 gal에 대해서는 1.81배를 나타내고 있다. 동일 하중(300 gal)에 대한 지진응답변위는 약 50%정도로 억제되었으며, 지진하중이 증가함(400 gal, 500 gal)에 따라 내진보강 공법의 효과가 증대, 즉 내력증가에 따라서 변위가 상승하여 지진에너지를 흡수 할 수 있는 능력이 증대되어 본 연구에서 제안한 SRCF 내진보강공법의 유효성을 확인 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 강도증진형 내진보강법의 단점을 보완·개선할 수 있는 새로운 개념의 내진보강법인 SRCF (Steel Reinforced Concrete Frame) 외부접합형 내진보강공법을 제안하였으며, SRCF 외부접합형 공법의 유용성을 검증 할 목적으로 기존 비내진상세를 가지는 중·저층 RC 학교건물의 골조를 대상으로 유사동적실험을 실시하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 반복가력실험을 실시한 C-RC 무보강 실험체의 최대하중은 311 kN (변위: 19.5 mm)으로서 전형적인 전단파괴를 보여주었다. 이것은 대상 학교건물인 비내진상세를 가지는 1980년대 건설된 학교건물의 파괴모드를 나타내어 주는 매우 중요한 자료라고 판단된다.
- 2) PD-RC, 즉 무보강 비교실험체의 유사동적실험 결과에 의하면 입력지진동 250 gal에서는 305 kN (변위: 11.9 mm)의 지진응답 최대내력을 나타내었으며, 지진피해 규모는 중규모 지진피해가 예측되었다. 한편, 동일 실험체에 대한 300 gal 입력지진동에서는 최대 지진응답 전단력 308.2 kN (변위: 16.7 mm)을 보여주었으며, 최종적으로 최대 지진응답을 나타낸 5.4초 부근에서 대상골조는 전단파괴하였다.
- 3) PD-SRCF 내진보강 실험체의 300 gal인 경우는 381.4 kN (변위: 8.9 mm)의 최대 지진응답 전단력을 나타내었으며, 결과적으로 SRCF 내진보강공법으로 내진보강 한 실험체는 300 gal의 지진에 대해서는 미세한 전단균열정도가 관찰되었으며, 435.4 kN (변위: 23.4 mm)의 최대 지진응답을 나타낸 400 gal의 지진에 대해서도 균열정도는 미세하여 내진보강법의 유효성이 검증되었다고 사료된다. 한편, 500 gal의 입력 지진동에서는 493.5 kN (30.25 mm)의 최대 지진응답 전단력을 보여주었으며, SRCF 내진보강법으로 보강한 실험체인 PD-SRCF는 500 gal의 지진동에서 소규모정도의 지진피해가 예상된다.
- 4) 기준실험체 대비 SRCF 외부접합형 내진보강법은 300 gal의 입력지진동에서 약 1.24배, 400 gal의 입력지진동에서는 1.41배, 500 gal의 입력지진동에서는 1.6 배 정도 지진응답 내력이 증가하여 전형적인 강도증진형 내진보강법이라고 사료된다. 300 gal에 대한 변위응답은 약 0.53배, 400 gal에 대해서는 1.4배,

500 gal에 대해서는 1.81배를 나타내고 있다. 동일 하중(300 gal)에 대한 지진응답변위는 약 50%정도로 억제되었으며, 지진하중이 증가(400 gal, 500 gal)에 따라 내력 및 변위가 증가하여 지진에너지를 흡수할 수 있는 능력이 증대된다는 사실을 확인하였다.

- 5) SRCF 외부접합형 내진보강법은 거주자가 거주가 가능하면서 내진보강 공사를 실시할 수가 있으며, 접합부 시공성이 탁월하며, 특히 필요 내진보강량 산정이 간편한 전형적인 강도증진형 내진보강공법으로 전단파괴가 지배적인 비내진상세를 가지는 국내 중·저층 RC 건물에는 내력확보가 용이한 내진보강공법이라고 판단되며, 그 유효성이 유사동적실험에 의해서 검증되었다고 사료된다.
- 6) 향후 본 연구에서 제안한 SRCF 외부접합형 내진보강법의 실용화를 위해서 내진보강 대상 건물 시스템 전체 수준에서 목표성능을 설정하여 최적의 내진보강위치, 보강골조 하부 및 기초를 포함한 전체 부재의 보강 시의 내진구조 거동을 포함한 개별부재의 연성능력, 내진보강효과 등을 유사동적 실험 결과를 바탕으로 한 해석적 연구에 의해서 검토해야 할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2013R1A1A2009761) 및 국토교통부 주거환경 연구사업의 연구비지원(과제번호14-RERP-B082884-01)을 받아 수행된 것임.

References

1. Korea Meteorological Administration (KMA), "http://www.kma.go.kr/weather/earthquake /report.jsp", 2014.
2. Ministry of Education (MOE) and Korea Institute of Educational Environment (KIEE), "Guideline for Seismic Evaluation and Rehabilitation of Existing School Buildings in Korea", 2011, p. 108.
3. Lee, K. S., Wi, J. D., Kim, Y. I., and Lee, H. H., "Seismic

- Safety Evaluation of Korean R/C School Buildings Built in the 1980s", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 13, No. 5, 2009, pp. 1-11.
4. Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), "Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings", Tokyo, Japan, 2003, p. 300.
5. Lee, K. S., Choi, H., and Yi, W. H., "Earthquake Damage Ratio Estimation and Seismic Capacity Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings in Korea", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-20, 2002.
6. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "FEMA 310 : Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard", Washington D.C., 1998, p. 400.
7. Seismic Strengthening Research Group (SSRG), "Seismic Strengthening of RC Buildings", *Ohmsha Press*, Tokyo, Japan, 2008, p. 230.
8. Lee, K. S. and Shin, S. W., "A New Methodology for Performance-based Seismic Evaluation of Low-rise Reinforced Concrete Buildings Using Nonlinear Required Strengths", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 11, 2013, pp. 151-166.
9. Lee, K. S. et al., "A Seismic Capacity Evaluation of RC Buildings Considering Their Masonry Spandrel-Walls Using Pseudo Dynamic Test", *Proceeding of Korea Concrete Institute (Spring)*, 2012.
10. Shibata A. "New Structural Analysis for Seismic Design", Morikita Press, Tokyo, Japan, 2003, p. 250.
11. Hakuno et al., "Hybrid Test Manual", *Institute of Industrial Science*, The University of Tokyo, 1988.
12. MTS, "Pseudodynamic Testing For 793 Controllers", MTS Systems Corporation, 1999, p. 34.
13. Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), "Standard for Damage Level Classification", Tokyo, Japan, 2001, p. 250.
14. Maeda, M., Nakano, Y., and Lee, K. S., "Post-Earthquake Damage Evaluation for R/C Buildings Based on Residual Seismic Capacity", *13th World Conference on Earthquake Engineering (Vancouver, B.C., Canada)*, 2004, p. 1179.

요 약 본 연구에서는 기존 강도증진형 내진보강법의 단점을 보완·개선할 수 있는 새로운 개념의 내진보강법인 SRCF (Steel Reinforced Concrete Frame) 외부접합형 내진보강법을 제안하였다. SRCF 보강법은 거주자가 거주가 가능하면서 내진보강 공사를 실시할 수가 있으며, 접합부 시공성이 탁월하며, 특히 필요 내진보강량 산정이 간편한 전형적인 강도증진형으로 전단파괴가 지배적인 비내진상세를 가지는 국내 중·저층 철근콘크리트 건물에는 내력확보가 용이한 내진보강공법이다. 본 연구에서 제안한 SRCF 외부접합형 공법의 유용성을 검증 할 목적으로 기존 중·저층 철근콘크리트 학교건물의 골조를 대상으로 유사동적실험을 실시하여 내진보강효과를 검토하였다. 그 결과, 국내에서 발생 가능한 최대 지진규모(300gal)에서 비보강 골조는 붕괴를 하였지만, SRCF 외부접합형 내진보강법으로 보강한 골조는 경미한 지진피해가 예상되었으며, 대규모 지진(400, 500gal)을 상정한 경우에도 소규모 이하의 지진피해가 예상되어 본 연구에서 개발한 SRCF 내진보강법의 유효성이 검증되었다고 사료된다.

핵심용어 : SRCF, 내진보강, 철근콘크리트, 유사동적실험, 중저층, 외부접합형