

비내진 철근콘크리트 건축물의 FRP 재킷에 대한 내진보강 설계 전략

Seismic Retrofit Scheme of FRP Column Jacketing System for Non-Seismic RC Building Frame

황희진¹⁾ · 김혜원²⁾ · 오근영³⁾ · 신지욱^{4)*}

Hwang, Heejin¹⁾ · Kim, Haewon²⁾ · Oh, Keunyeong³⁾ · Shin, Jiuk^{4)*}

¹⁾경상국립대학교 건축공학과 석사과정, ²⁾국립재난안전연구원 지진방재센터 공학박사, ³⁾한국건설기술연구원 건축연구본부 전임연구원, ⁴⁾경상국립대학교 건축공학과 조교수 (공학박사)

¹⁾Student, Department of Architecture Engineering, Gyeongsang National University, ²⁾Senior Research Officer, National Earthquake Hazards Reduction Center, National Disaster Management Research Institute, ³⁾Research Specialist, Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ⁴⁾Assistant Professor(PhD), Department of Architecture Engineering, Gyeongsang National University

/ A B S T R A C T /

Existing reinforced concrete buildings with seismically deficient details have premature failure under earthquake loads. The fiber-reinforced polymer column jacket enhances the lateral resisting capacities with additional confining pressures. This paper aims to quantify the retrofit effect varying the confinement and stiffness-related parameters under three earthquake scenarios and establish the retrofit strategy. The retrofit effects were estimated by comparing energy demands between non-retrofitted and retrofitted conditions. The retrofit design parameters are determined considering seismic hazard levels to maximize the retrofit effects. The critical parameters of the retrofit system were determined by the confinement-related parameters at moderate and high seismic levels and the stiffness-related parameters at low seismic levels.

Key words: FRP jacketing system, Reinforced concrete frame building, Seismically-deficient details, Retrofit effect, Retrofit strategy

1. 서론

내진설계 기준이 도입되지 않은 1988년 이전에 건설된 철근콘크리트 건축물은 대부분 1.4 DL(고정하중)+1.7 LL(활하중)과 같은 중력하중에 대하여 설계되어 지진에 취약한 특성을 갖는다[1]. 구조부재인 기둥의 전단저항성은 현재 내진설계 기준에 의한 기둥에 비하여 낮은 수준을 보인다. 이는 기둥의 전단철근비가 낮아 주철근의 좌굴 저항성과 콘크리트의 구속력이 부족하기 때문이다. 또한, 콘크리트 표면에 균열이 발생하였을 때, 콘크리트 중심부의 구속압력과 좌굴 저항성이 90° 갈고리 띠철근의 사용으로 급격하게 저하될 수 있다[2, 3]. 이와 더불어, 최대 모멘트가 발생하는 영역에 위치하는 겹침이음이 부차 파괴를 초래하여 조기파단의 원인이 된다[3-7]. 중력하중에 대하여 설계되어 지진에 취약한 철근콘크리트 기둥을 가

진 건축물은 WCSB(Weak Column-Strong Beam) 시스템을 가져 특정 영역에 구조적 손상이 집중되는 연층현상(Soft-story Mechanism)이 발생할 수 있다. 이전 연구[14-16]에서 중력하중 설계 철근콘크리트 구조물의 연층현상을 축소모형 진동대 실험을 통해, 1층 기둥 하단에 소성 힌지가 형성되고, 1층에 심각한 손상이 집중됨을 보여주었다.

건축물의 지진피해를 저감하기 위하여, 여러 가지 보강공법이 개발되었다. 연성능력이 낮은 철근콘크리트 기둥은 취성파괴 없이 연성거동을 할 수 있도록 콘크리트, 강재, 섬유강화폴리머(Fiber-reinforced Polymer, FRP) 재료들을 사용하여 재킷 보강 시스템을 구성한다. 이 중 FRP 재킷 시스템은 FRP 재료와 그라우팅 재료로 구성된 복합소재 기반의 재킷 시스템이다. FRP 재킷은 축하중을 받는 내부 구조요소의 파괴팽창을 억제함으로써 추가적인 구속력을 기둥에 부여하여 부재의 횡 저항성을 향상시킬 수 있다[3-5]. 과거의 연구[17, 18]를 통해서 FRP 재킷의 설치에 의한 추가 구속력을 통하여 철근콘크리트 기둥의 강도 및 연성 능력 향상에 효과가 있음을 입증하였다. 그라우팅 재료는 FRP 재킷과 기존 기둥 사이의 공간을 채워 기존 기둥의 단면 형상을 정사각형/직사각형에서 원형/타원형으로 변경하여

*Corresponding author: Shin, Jiuk

E-mail: jiukshin@gnu.ac.kr

(Received July 7, 2023; Revised September 2, 2023; Accepted September 4, 2023)

기둥 단면 내의 구속면적을 최대화하기 위하여 활용한다[20]. 이러한 구조적 이점과 다른 재료에 비해 경량이고 간단한 시공공정 등의 시공적 이점으로 손상된 RC 기둥에 긴급 보수기법으로 활용하고 있다. 과거 실험 및 수치 연구[10-13]를 통해 강도와 변형과 관련하여 FRP 재킷 시스템을 통한 손상된 기둥의 보강 후 내진 성능향상 효과를 입증하였다.

본 연구의 목적은 지진에 취약한 저층 콘크리트 건축물을 대상으로 FRP 재킷 시스템의 주요설계변수를 정의하고, 주요 설계변수를 기반으로 보강 전략을 구축하는데 있다. 이를 위하여 FRP 재킷 보강 시스템의 주요 변수는 구조 상세에 따라 산정된 구속비와 강성비로 분류하여 비보강 상태와 보강상태의 응답을 비교, 분석하였다. 구조물의 응답을 산정하기 위하여 과거 실험 규모 동적 실험[6-8]의 대상 건축물인 2층, 2경간 철근콘크리트 건축물을 사용하였으며, LS-DYNA[21]를 활용하였다. 동적 실험을 통해 대상 건축물의 기둥에서 휨-전단파괴의 발생을 검증하였다. 또한, FRP 재킷 보강 시스템의 주요 변수에 따른 응답을 계산하기 위하여 실험 실험 기반으로 개발 및 검증된 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 모델[22]을 활용하였다.

2. FRP 기둥 재킷 시스템

FRP 재킷 시스템은 Fig. 1과 같이 FRP 재료와 그라우팅 재료로 구성한다. FRP 재료로 둘러싸인 기존 철근콘크리트 기둥은 축력에 의해 발생하는 부피팽창이 억제되어 추가적인 구속력이 부가됨에 따라, 전단 저항 성능을 개선할 수 있으며, 콘크리트 압축강도(f_{cu})와 극한 변형률(ϵ_{cu})이 향상된다[17-19]. 이전 연구진은 반복하역 실험을 통하여 FRP 재킷이 부착된 비연성 철근콘크리트 기둥의 조기파단을 지연시킬 수 있음을 확인하였으며, 보강 시스템이 지진에 취약한 특성을 갖는 기둥이 연성 거동할 수 있음을 보여주었다[23-25]. 앞선 실험 연구에서 FRP 재킷의 설치로 추가적인 구속력에 의해 철근콘크리트 기둥의 강도와 연성능력 향상에 효과가 있음을 입증하였지만, 보강효과는 재킷의 인장 강도와 두께에 따라서 산정되는 구속압력에 의해 측정되었다[26-28].

FRP 재킷 시스템의 그라우팅 재료는 FRP 재킷에 의하여 발생하는 구속압력을 기존 기둥 영역으로 전달하는 데 핵심적인 역할을 한다. 이와 같은 그라우팅 재료의 역할은 압축강도와 탄성계수의 영향을 받는다. 이전 연구진은 높은 압축강도를 갖는 그라우팅 재료의 취성 특성이 FRP 재킷에 의한 후프 응력(hoop stress)에 대한 균일한 분포에 영향을 미칠 수 있음을 입증하였다[29]. 또한, 그라우팅은 FRP 재킷과 기존 기둥 사이의 공간을 채워 단면 형상을 정사각형/사각형에서 원형/타원형으로 전환하여, 사각형 단면

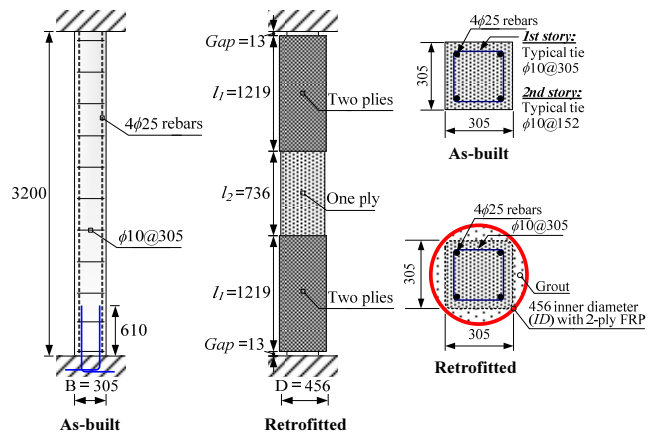


Fig. 2. Column detail of full-scale test

에서 부분적으로 발생하는 구속영역(confined area)이 원형 단면의 경우 단면 전체가 구속영역으로 변경될 수 있다. Haroun et al.(2003)은 FRP 재킷에 의해 균일하게 구속된 원형 또는 타원형 단면이 FRP 재킷에 의해 부분적으로 구속된 사각형 또는 직사각형 단면보다 효과적임을 실험을 통해 입증하였다[20].

최근에, FRP 재킷 시스템으로 보강된 2층, 2경간의 비연성 철근콘크리트 건축물을 대상으로 실험 규모 동적 실험이 진행되었다[6, 30]. 실험에 사용된 건축물은 1960년대 ACI(American Concrete Institute) 설계기준[31]을 바탕으로 중력하중만 고려하여 설계되었다. FRP 재킷 보강은 전단, 연성, 겹침이음의 저항성능을 향상시키기 위하여 1층 기둥에 설치되었다. Fig. 2는 비보강 및 보강된 기둥의 상세 사형을 보여준다. FRP 재킷 시스템의 보강효과는 비보강 실험체와 보강 실험체의 동적응답을 비교하여 조사하였다. 동적 실험을 통하여 비보강 실험체 대비 보강 실험체는 연성능력 향상에 의하여 연층현상의 지연 효과를 보였다. 해당 실험을 통하여 측정된 실제 동적 응답을 바탕으로 유한요소 해석 모델을 개발 및 검증되었다.

3. 역량스펙트럼법을 이용한 지진 응답

본 연구에서 유한요소 모델의 지진응답은 CSM(Capacity spectrum method)으로 알려진 비선형 정적해석(nonlinear pushover analysis) 기반 방법으로 산정하였다. 이 장은 CSM으로 도출된 지진응답의 계산 과정을 설명한다.

3.1 역량스펙트럼법을 이용한 지진응답

이전 연구에서[22] 비보강 모델(as-built 모델)과 보강 모델은 유한요소 해석 프로그램 LS-DYNA[21]를 사용하여 모델링되었고, 실제 동적 실험에서 얻은 실험 응답을 통해 검증되었다[2, 6]. Fig. 3는 본 연구에서 활용한 과거 연구에서 검증된 유한요소 해석모델을 보여준다. 해당 모델의 콘크리트는 최대강도 도달 이후 변형 연화, 전단 팽창, 구속효과를 나타낼 수 있는 Karagozian & Case 콘크리트 모델이 사용되었다. 모든 철근은 탄소성 재료 모델(elasto-kinematic material)로 정의되었다. 보강된 모델에서 그라우팅 재료는 FRP 재킷으로 발생된 추가적인 구속압력을 전달하기 위해

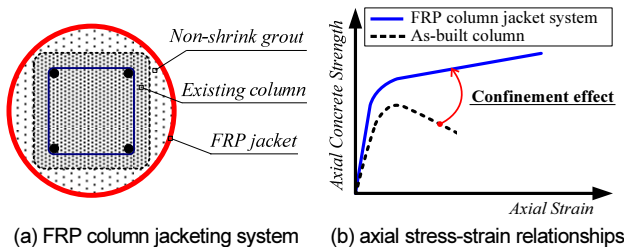


Fig. 1. FRP column jacketing system

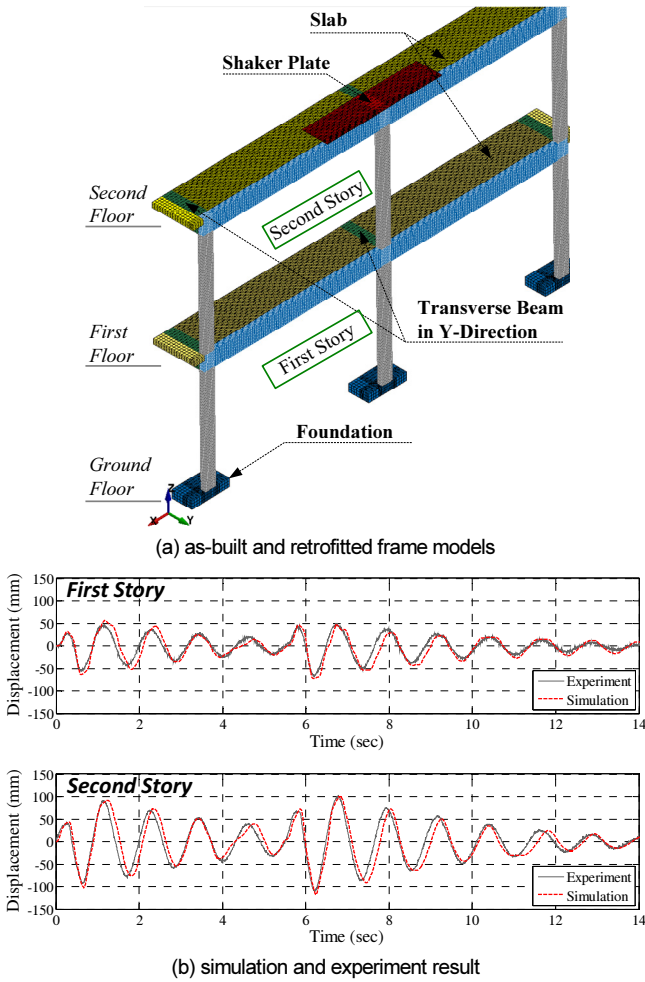


Fig. 3. Numerical model of non-ductile RC frame

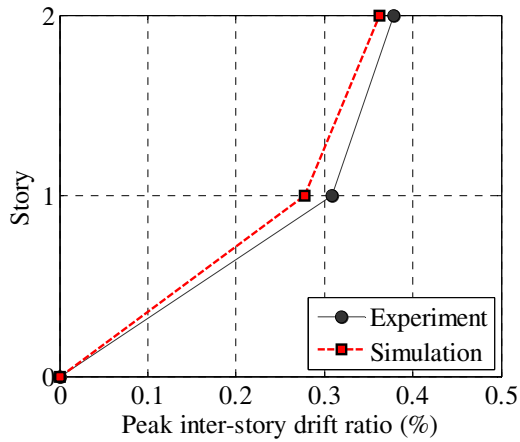


Fig. 4. Comparison of peak inter-story drift ratios for the retrofitted FE frame model

solid element로 설정되었다. FRP 재킷은 shell element와 로컬 주축을 따라 재료 특성을 정의할 수 있는 linear orthotropic 재료 모델이 사용되었다. 보강 시스템은 그라우팅 재료와 기존 사이와 FRP 재료와 그라우팅 재료 사이의 두 개의 접촉면을 가지고 있으며, 이 해당 접촉면은 LS-DYNA에서 제공하는 surface-to-surface contact function을 활용하였다.

실물 규모 동적 실험에서 발생한 철근과 이를 둘러싸고 있는 콘크리트

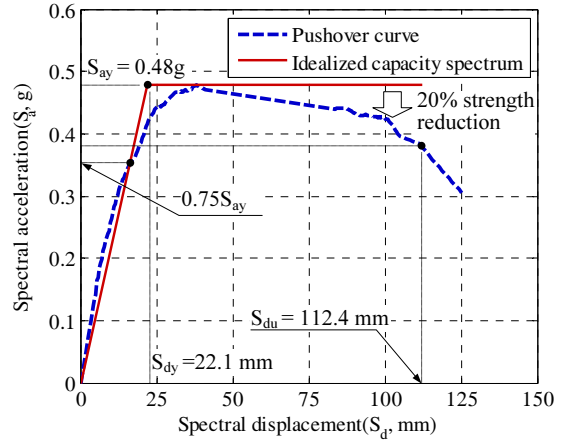


Fig. 5. Capacity spectrum curve in ADRS format

사이의 부착파괴를 구현하기 위해, LS-DYNA의 1D-Slide Line을 비보강 및 보강 모델에 적용하였다. 부착거동은 전단계수(G_c), 최대 탄성 슬립(S_{max}), 손상계수(h_{dmg}) 등으로 묘사할 수 있다. 비보강 및 보강 모델의 부착효과 매개변수는 파괴 유형 및 철근 상세 조건을 기반으로 정의하였다. 이 중 실험체의 겹침이음과 접합부 영역에서 측정된 항복 유형을 기반으로 부착파괴가 모델링되었다. 일반적으로 건축물 구조해석에 많이 활용되는 OpenSees, ZeusNL 등 매크로 해석 기법(Macroscopic model)을 활용한 구조해석 툴은 fiber 요소를 기반으로 하고 있기 때문에 전단 스프링 등의 고려 없이 주요 구조부재에 발생할 수 있는 전단파괴, 부착파괴 등을 고려할 수 없다. 그러나 본 연구에서 활용된 FE 해석 방법은 마이크로 해석 기법(Microscopic model)으로 구속효과, 전단파괴, 부착파괴 등을 비교적 정확하게 묘사할 수 있다. 본 연구에서 활용한 FR 기반 해석모델은 실규모 동적 실험 대비 지진 및 사인파에 대한 시간-변위 이력 곡선과 최대 층간변위 비가 12.0% 이내의 오차를 보였으며, Fig. 4에 나타난 것과 같이 1층 최대 층간변위 비가 약 12.0%의 오차를 보였다[32]. 이와 같은 결과로 검증된 유한요소 해석모델은 각 파괴유형을 정확히 묘사할 수 있음을 보였다. 비보강 모델의 역량스펙트럼 곡선은 Fig. 5에 나타나 있다. 본 연구는 동적실험을 기반으로 검증된 비보강 및 보강 FE 모델을 활용하였으며, 해당 모델의 하중 및 보강 변수를 다양화하여 매개변수 연구를 수행하였다. 또한 하중 및 보강 변수 변화에 따른 해석모델의 내진성능은 과거 연구[37]에서 제안한 에너지 기반의 성능 한계값을 적용하여 평가하였다.

3.2 성능평가 방법론

본 연구는 CSM 방법을 활용하여 지진하중에 대한 건축물의 발생 변위를 산정하였다. 구조물의 내진 성능을 평가하는 방법인 CSM은 ATC-40[33]와 FEMA-274[34]에서 제시된 단순화된 해석 절차이며, Freeman et al. (1975)[35]이 제안했다. 산정한 변위를 기반으로 건축물의 내진성능을 평가하기 위하여 FEMA-356[36]은 세가지 수준인 즉시입주(Immediate Occupancy, IO), 인명보호(Life Safety, LS), 붕괴방지(Collapse Prevention, CP)에 대하여 IDR(Intern-story Drift Ratio) 기반의 성능 한계를 제시하였다. FRP 재킷 시스템은 기둥의 연성능력을 향상시키도록 연성능력과 연계된 비탄성 거동의 영향을 고려하지 않은 IDR 기반의 성능 한계는 내진성

능을 추정하기에 부적합할 수 있다. 따라서 본 연구에서 보강된 건축물의 내진성능을 평가하기 위해서, 지진 고유 특성에서 발생하는 비탄성 수기의 영향과 보강된 내진성능의 영향을 포함하는 Park & Ang이 제안한 손상모델 (Park-Ang 손상모델)을 활용하여 에너지 기반의 성능[37] 한계를 사용하였다. Park-Ang 손상모델은 구성요소 및 시스템 수준에서 보강 또는 비보강의 비연성 철근콘크리트 건축물의 구조적 손상의 정량화에 널리 사용되었다[37-42]. 해당 손상모델은 Eq. (1)에 제시되어있으며, 최대변위 응답 (δ_m), 극한 변위(δ_u), 항복 전단 강도(V_y), 반복하중 효과를 반영한 계수(β) 그리고 지진에 의한 에너지 응답($\int dE$)을 보여준다.

$$D_T = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{V_y \delta_u} \int dE \tag{1}$$

Park & Ang 손상모델을 활용한 FRP 재킷 시스템이 보강된 철근콘크리트 골조 구조시스템의 에너지 기반 손상한계는 Table 1과 같다. 해당 손상한계를 산정하는 과정은 다음 논문[43, 44]을 참고할 수 있다.

Table 1. Energy-based performance thresholds for FRP-retrofitted frame structures [43, 44]

Level (i)	Seismic performance level	IDR-based damage threshold	Energy-based damage threshold (D_i)	Summary of damage conditions
1	Immediate Occupancy (IO)	≤ 1.0	≤ 0.42	Minor hairline cracking; no crushing
2	Life Safety (LS)	≤ 2.0	≤ 0.76	Minor spalling in non-ductile column, joint cracks < 3.2 mm
3	Collapse Prevention (CP)	≤ 4.0	≤ 1.43	splice failure in some non-ductile column
4	Collapse	greater than 4.0	greater than 1.43	Collapse

Table 2 Summary of parametric frame models using combination of retrofit parameters

Group	Model	r_i	FRP shell		Grouting system		σ_R (MPa)	CR	SR
			f_{ju} (MPa)	t_j (mm)	d_{gi} (mm)	f_g (MPa)			
Non-retrofitted	Non-retrofit	None	None	None	None	None	None	0	1
Retrofitted	RF1	First story (r_1) & All story (r_2)	166	3.60	444	42.9	2.69	0.08	2.91
	RF2		419	3.60	444	42.9	6.79	0.20	2.91
	RF3		1380	3.60	444	42.9	22.38	0.66	2.91
	RT1		419	0.70	444	42.9	1.32	0.04	2.91
	RT2		419	6.50	444	42.9	12.27	0.36	2.91
	RD1		419	3.60	502	42.9	6.01	0.18	4.85
	RD2		419	3.60	559	42.9	5.40	0.16	7.54
	RG1		419	3.60	444	13.8	6.79	0.20	2.08
	RG2		419	3.60	444	89.3	6.79	0.20	3.75
	RFD1		166	3.60	559	42.9	2.14	0.06	7.54
	RFDT1		419	6.50	559	42.9	9.74	0.29	7.54

3.3 보강 시스템의 주요 매개변수

본 절은 FRP 기둥 재킷 시스템의 보강효과에 영향을 미치는 주요 매개변수에 관하여 설명하고 있다[5-10]. 본 연구에서는 보강 위치(r_i , i 는 보강 시스템이 설치된 층), FRP 재킷 두께(t_j), FRP 재킷 강도(f_{ju}), 보강 기둥 단면의 내경(d_{gi}) 그리고 그라우팅 재료의 강도(f_g) 총 다섯 가지의 주요 매개변수를 선정하였다. Table 2은 FRP 기둥 재킷 시스템 모델의 다섯 가지 매개변수 조합을 요약한 것이다. 매개변수(t_j, f_{ju}, d_{gi} 그리고 f_g)의 최소값 및 최대값은 과거 연구 문헌을 참고하여 결정하였다[43]. 해당 표에서 RF1 모델은 실험 크기의 동적 실험에 사용된 실험체의 FRP 재킷 보강 매개변수를 나타낸 것이다. RF2 모델의 보강 변수 중 구속비(CR)와 관련된 FRP 변수(f_{ju} 및 t_j)와 강성 관련 변수(d_{gi} 및 f_g)는 최소값과 최대값 사이에서 구성되어 있다. 해당 표에서 CR(Confinement Ratio)은 콘크리트 압축 강도 대비 구속압의 비율을 나타낸 것이며, SR(Stiffness Ratio)은 비보강 상태 기둥의 초기 강성 대비 단면 확장 후 보강된 기둥의 초기 강성 비율을 의미한다. CR의 계산에 활용된 구속압은 Eq. (2)에 제시되어 있다. 여기서 r은 보강 시스템 적용에 따른 확장 단면(d_{gi})의 반지름을 의미한다. Fig. 6은 CR

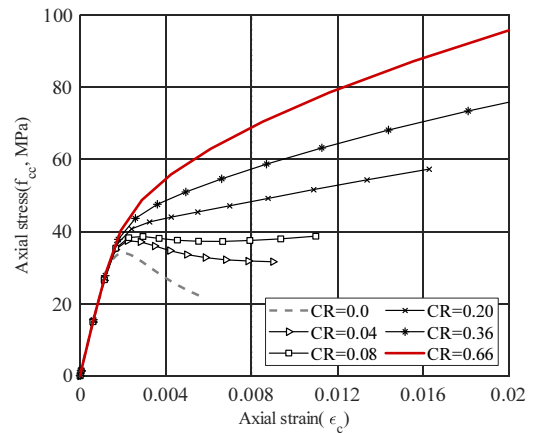


Fig. 6. Axial stress-strain relationships for ratio derived from confined concrete model [45]

값의 변화에 따른 콘크리트 축력-변형률의 관계를 나타낸 것이다. CR = 0 은 비구속 상태의 콘크리트의 거동을 보여주며, CR 값의 증가에 따라 구속 콘크리트 강도(f_{cc})와 재료의 연성능력이 향상되는 것을 볼 수 있다. FRP 재킷 시스템의 보강효과에 대한 구속에 대한 영향을 평가하기 위해 RF1부터 RT2 모델은 강성비(SR)의 변화 없이 f_{ju} 및 t_j 변수의 값을 변경하여 CR은0.004~0.66의 범위로 설정하였다. 또한, RF2 모델을 기준으로 매개 변수 d_{gi} 및 f_g 의 값을 수정하여 SR이 지진에 의한 응답 감소에 미치는 영향을 조사하여 RD1부터 RG2 모델을 형성하였다. SR의 증가에 따른 보강효과 검토를 위하여 RFD1 모델을 구성하였고, SR과 CR을 모두 증가시켰을 때, 보강효과를 조사하기 위하여 RFDT1 모델을 개발하였다. 그림에 제시된 CR에 따른 콘크리트의 거동은 Lee et al.[45]에 의하여 제안된 단면 해석 모델을 활용하였다.

$$\sigma_R = f_{ju} t_j / r \tag{2}$$

4. 보강 시스템의 효과

본 절은 CR 및 SR과 관련된 주요 보강 매개변수(r_i, t_j, f_{ju}, d_{gi} 그리고 f_g)의 변화에 따른 응답의 차이를 조사하였다. CR은FRP 재킷에 대한 변수 t_j, f_{ju} 그리고 d_{gi} 와 관련 있으며, SR은 그라우팅에 대한 변수 d_{gi} 와 f_g 에 따라서 2.08~7.54의 범위로 설정하였다. 이전 실험 연구[46, 47]에서 FRP 기동 재킷 시스템을 사용하여 최대 구속 콘크리트 강도(f_{cc})와극한 변형률(ϵ_{cu})을 향상시키는CR의 최소한계($CR_{min} = 0.07$ 및 0.15)를 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구 결과를 바탕으로 CR에 대하여 $CR < 0.07, 0.07 \leq CR < 0.15$ 그리고 $0.15 \leq CR$ 로 분류하여 레벨을 구성하였다. CR과SR의 변수에 대한 해석모델은MCE(Maximum Considerable Earthquake, 최대 지진) 요구 스펙트럼 가속도의 크기에 따라 3개의 지진 시나리오를 고려하였다. 낮은 위험 수준의 지진은 $S_a = 0.5$ g, 중간 위험 수준의 지진은 $S_a = 1.5$ g, 높은 위험 수준의 지진은 $S_a = 3.0$ g로 가정하였다.

4.1 구속비(Confinement Ratio, CR)

Fig. 7은 세 가지 지진 시나리오에 대한CR 레벨과 에너지 기반 손상한계(D_E)의 관계를 보여준다. Fig. 7 (a)는 $S_a = 0.5$ g일 때, CR과 D_E 의 관계를 나타내었다. 내진 성능 레벨의 측면에서 비보강 모델은LS, 보강된 모델은 IO로 분류되었으며, 보강된 모델에서 CR의 레벨에 따른 D_E 의 변화는 두드러지지 않았다. 가장 낮은 D_E 가 산정된 모델 RFD1와RFDT1은 공통적으로 SR이 7.54의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 $S_a = 0.5$ g(낮은 위험 수준) 시나리오에서는CR 관련 변수(t_j 및 f_{ju})보다SR 관련 변수(d_{gi} 및 f_g)의 영향이 큰 것을 의미한다.

Fig. 7 (b)는 $S_a = 1.5$ g일 때 CR과 D_E 의 관계를 나타내었다. 내진 성능 레벨의 측면에서 비보강 모델은CP로 산정되었지만, 보강 모델은LS를 초과하지 않았다. 중간 위험 수준의 지진에서는 보강된 모델의CR 레벨이 증가함에 따라 D_E 가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. CR-II에서 모델 RF1

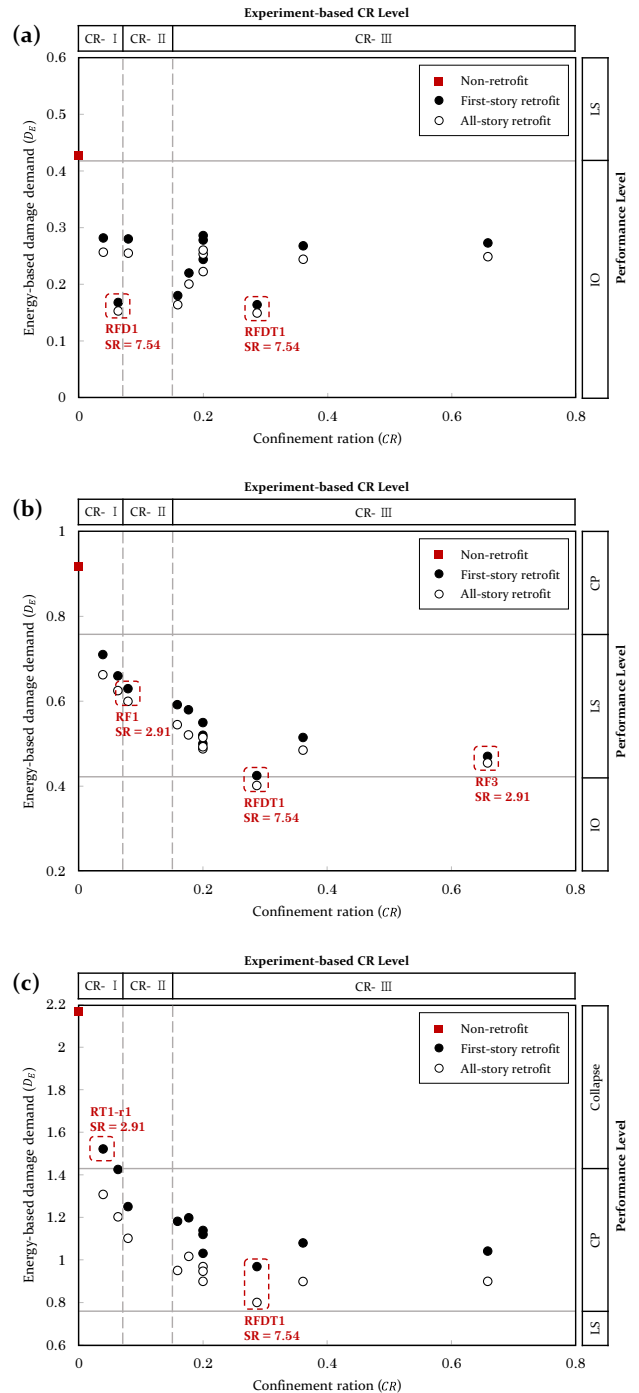


Fig. 7. Relationship between confinement ratio and energy-base damage demand

의SR은2.91이고CR-III에서 모델 RF3의SR은2.91으로 동일한 값을 갖지만, 모델 RF3의 D_E 가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 $S_a = 1.5$ g(중간 위험 수준) 지진 시나리오에서는SR 관련 변수보다CR 관련 변수가 D_E 의 감소에 미치는 영향이 큰 것을 의미한다. 또한, CR-III에 높은SR로 모델링된 RFDT1은 고려된 보강 모델 중 D_E 가 가장 낮게 산정되었다.

Fig. 7 (c)는 $S_a = 3.0$ g일 때 CR과 D_E 의 관계를 나타내었다. 내진 성능 레벨의 측면에서 비보강 모델과 CR-I에서 1층만 보강한 모델 RT1-r1은 붕괴하였지만, CR-II 및 CR-III으로 보강된 모델들은 CP를 초과하지 않았다.

중간 위험 수준의 지진 시나리오의 경우에서 분석한 바와 같이, 보강된 모델의 CR 레벨이 증가함에 따라 D_E 가 점차 감소 되는 것을 보이고 있다. 또한, $CR \geq 0.2$ 인 경우 SR과 관계없이 낮은 D_E 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 $S_a = 1.5$ g(중간 위험 수준)과 $S_a = 3.0$ g(높은 위험 수준)의 지진 시나리오에서는 CR 관련 변수의 영향이 크며, 특정 값 이상의 구속비가 적용되어 연성능력의 향상만으로도 내진 성능을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 보강 모델 중 RFDT1의 세 가지 지진 시나리오에 대한 D_E 의 변화를 보게 되면, $S_a = 0.5$ g와 $S_a = 1.5$ g에서는 보강 시스템의 위치에 따른 D_E 의 차이가 작았지만 $S_a = 3.0$ g의 경우에는 확연한 차이를 보였다. 이는 $S_a = 3.0$ g(높은 위험 수준)의 지진 시나리오에서는 1층만 보강한 모델의 1층과 2층의 강성 차이가 건축물의 에너지 불균형을 발생시켜 전 층을 보강한 모델에 비하여 D_E 가 높게 산정되는 것이다.

4.2 강성비(Stiffness Ratio, SR)

Fig. 8은 S_a (0.5 g, 1.5 g, 3.0 g)로 정의된 세 가지 지진하중 시나리오에 대한 SR과 D_E 의 관계를 보여준다. Fig. 8 (a)는 $S_a = 0.5$ g일 때, SR과 D_E 의 관계를 나타내었다. 내진 성능 레벨의 측면에서 비보강 모델은 LS 그리고 보강된 모델은 IO로 분류되었으며, 보강된 모델에서 SR이 증가함에 따라 D_E 는 감소하였다. SR은 동일하지만 CR = 0.04인 모델 RT1와 CR = 0.66인 모델 RF3 사이의 지진 요구의 최대 변동은 약 3.3%으로 확인되었다. 이는 $S_a = 0.5$ g(낮은 위험 수준) 시나리오에서는 CR 관련 변수보다 SR 관련 변수가 D_E 의 감소에 미치는 영향이 큰 것을 의미한다.

Fig. 8 (b)와(c)는 각각 $S_a = 1.5$ g와 $S_a = 3.0$ g일 때, SR과 D_E 의 관계를 나타내었다. 중간 및 높은 위험 수준의 지진 시나리오에서 SR의 증가에 따른 D_E 값의 변화가 두드러지지 않았다. 또한, SR이 7.5이고 CR-III로 모델링된 RFDT1-r2은 가장 낮은 D_E 로 SR이 2.91이고 CR-I로 모델링된 RT1-r1은 가장 높은 D_E 로 산정되었다. $S_a = 0.5$ g와 비교하였을 때, SR이 2.91인 경우는 CR이 0.04에서 0.66으로 그리고 SR이 7.54인 경우에는 CR이 0.06에서 0.29로 증가함에 따라 D_E 가 점진적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 특히, $CR \geq 0.2$ 의 범위에 속하는 모델의 경우엔 D_E 가 확연히 감소하였다. 이는 $S_a = 1.5$ g(중간 위험 수준)과 $S_a = 3.0$ g(높은 위험 수준)의 지진 시나리오에서는 CR 관련 변수의 영향이 크며, 특정 값 이상의 구속비가 적용될 경우 SR이 증가하는 D_E 의 감소를 극대화하였다.

4.3 보강효과

본 연구에서는 CR 및 SR에 대한 FRP 재킷 시스템의 보강효과를 정량화하기 위해 Eq. (3)을 사용하여 보강된 모델의 최대 에너지 요구 값(D_{E-RET})과 보강되지 않은 모델의 에너지 요구 값(D_{E-AS})을 비교하여 에너지 요구 값의 감소 비율을 산출하였다.

$$Energy\ reduction\ ratio\ (\%) = \frac{(D_{E-AS} - D_{E-RET})}{D_{E-AS}} \times 100 \quad (3)$$

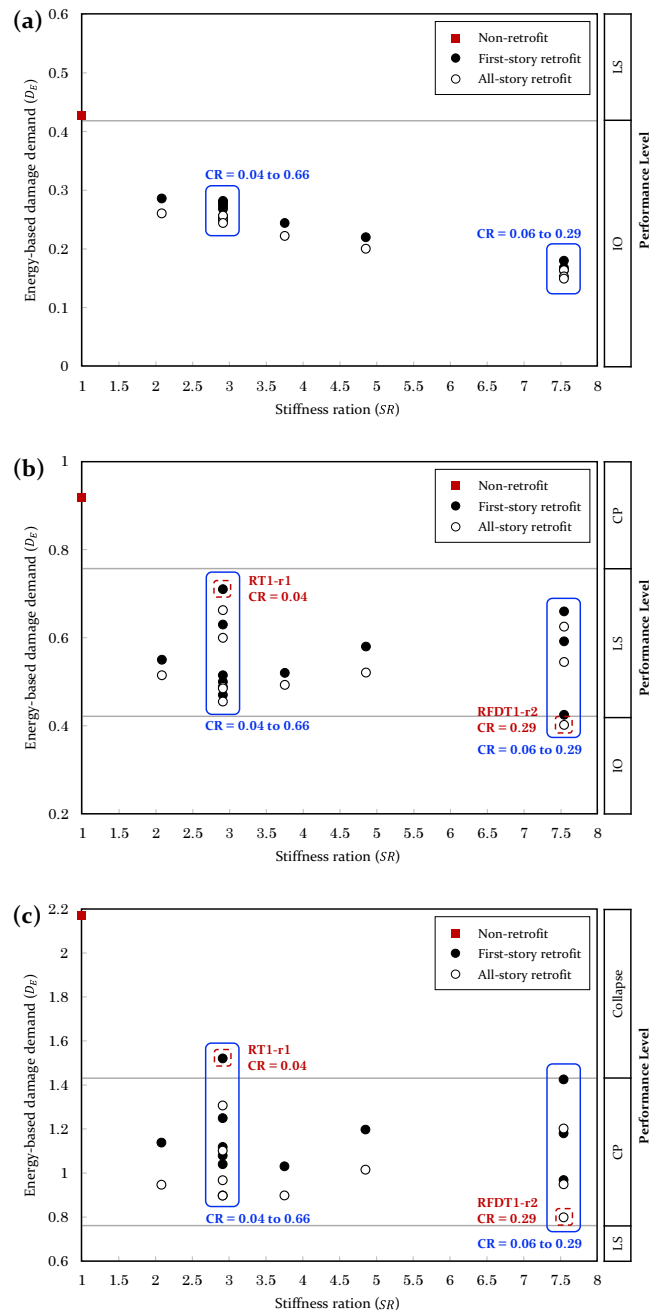


Fig. 8. Relationship between stiffness ratio and energy-base damage demand

Fig. 9 (a)는 CR의 레벨에 대한 에너지 감소 비율을 나타내어 CR-I, CR-II 그리고 CR-III 측면에서 보강 시스템의 효과를 보인다. 낮은 위험 수준의 지진($S_a = 0.5$ g)의 평균 보강효과는 39.8%이며, CR의 레벨에 따른 보강효과의 변화는 두드러지지 않았다. CR-I의 모델 중 SR이 7.54인 보강 모델은 평균 보강효과인 57.9%보다 높은 보강효과를 보였다. 중간 위험 수준의 지진($S_a = 1.5$ g)과 높은 위험 수준의 지진($S_a = 3.0$ g)의 보강효과의 평균은 각각 39.9%와 45.7%으로 산정되었다. 두 지진 시나리오에서는 CR의 레벨에 따라 보강효과가 향상되는 경향을 확인할 수 있다. CR-III에서 보강효과의 평균은 $S_a = 1.5$ g인 경우 44.2%, $S_a = 3.0$ g인 경우 49.6%이며, CR-I에서 보강효과의 평균은 $S_a = 1.5$ g인 경우 26.3%, $S_a = 3.0$ g

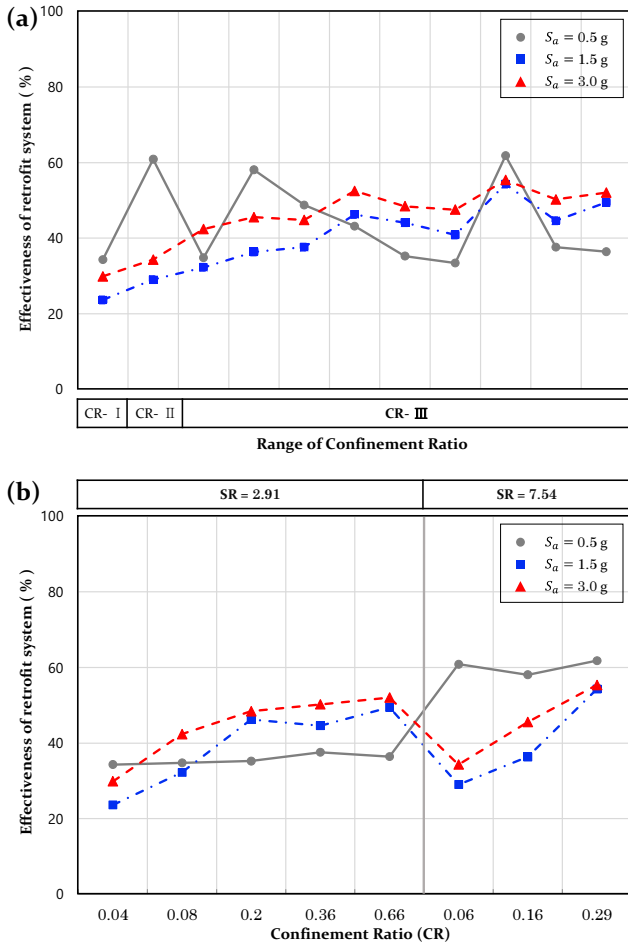


Fig. 9. Retrofit effect of FRP Column Jacketing system

인 경우 32.1%로 산정되었다. 이를 통해 CR-III일 때, CR-I보다 보강효과가 1.54배 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 중간 및 높은 위험 수준의 지진 ($S_a = 1.5$ g 및 $S_a = 3.0$ g)에서 CR-III의 모델 중 $CR \geq 0.2$ 인 경우 평균 보강효과보다 더 높은 보강효과를 보였다. 이는 CR의 증가로 기둥의 연성능력이 향상되었기 때문이다. 결론적으로, CR은 낮은 위험 수준의 지진 ($S_a = 0.5$ g)에서는 보강효과에 미미한 영향을 주었지만, 중간 및 높은 위험 수준의 지진 ($S_a = 1.5$ g 및 $S_a = 3.0$ g)에서는 에너지 요구 값의 감소 비율에 큰 영향을 미쳤다.

Fig. 9 (b)는 CR의 크기 순서에 따라 모델을 배치하고 SR의 대표 값인 2.91 및 7.54로 구분하여, 동일한 SR에서 다양한 CR에 대한 에너지 수요 감소 추세를 파악할 수 있다. 낮은 위험 수준의 지진 ($S_a = 0.5$ g)에서 SR이 2.91인 경우 CR의 증가에 따라 보강효과가 29.3%~32.8% 정도의 미미한 변화만 발생하였다. 그러나 SR이 2.91에서 7.54로 증가함에 따라, 보강효과가 29.3%~32.8%에서 54.9%~58.9%로 큰 변화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 중간 및 높은 위험 수준의 지진 ($S_a = 1.5$ g 및 $S_a = 3.0$ g)에서는 SR에 관계없이 CR이 증가함에 따라 보강효과가 점진적으로 증가하였다. 하지만 SR이 2.91인 경우 CR이 0.20에서 0.66으로 변화함에 따라 보강효과는 $S_a = 1.5$ g 경우 44.6%~49.5%로, $S_a = 3.0$ g 경우 48.4%~52.0%로 산정되었다. 또한, $CR \geq 0.2$ 의 영역에서 SR이 2.91에서 7.54로 증가함에 따라 보강효과는 $S_a = 1.5$ g 경우는 평균 47.1%에서 54.0%로,

$S_a = 3.0$ g 경우는 평균 50.2%에서 55%로 향상되었다. 이를 통하여 $CR \geq 0.2$ 의 영역에서는 CR의 증가가 에너지 수요 감소에 미미한 영향을 미치며, SR의 증가가 보강효과를 극대화한다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 과거 실험을 기반으로 개발 및 검증된 FRP 재킷 시스템으로 보강된 지진에 취약한 철근콘크리트 건축물의 유한요소해석 모델을 활용하여 세 가지 지진 시나리오에 대해 보강 시스템의 주요 변수에 따른 보강전략을 비보강 상태의 응답과 비교, 분석하여 구축하였다. 주요 변수는 FRP 재킷 보강 시스템의 구속비와 강성비로 분류하여 산정하였다. 본 연구에 대한 결론은 아래와 같다.

- (1) 낮은 위험 수준 지진 시나리오에서 CR의 증가가 내진 성능 수준에 큰 영향을 미치지 않았으며, 중간 및 높은 위험 수준 지진 시나리오에서는 CR의 증가에 따라 내진 성능 수준이 향상되는 것으로 조사되었다. 중간 및 높은 위험 수준 지진 시나리오의 내진 성능 수준은 $CR \geq 0.2$ 범위에선 SR의 값과 관계없이 향상하는 것이 확인되었다. 이를 통해 중간 및 높은 수준의 지진하중의 경우 비내진 상재를 보유한 건축물의 기둥에 추가적인 구속력만으로도 연성능력의 향상과 횡 방향의 변형 저항 능력을 확보할 수 있다는 것을 보여준다.
- (2) 낮은 위험 수준 지진 시나리오에서는 SR의 증가에 따라 내진 성능이 향상하며, 중간 및 높은 위험 수준의 지진 시나리오에서는 SR 관련 변수 (예: 단면확장, 그라우팅 강도)보다 CR 관련 변수 (예: 재킷 강도, 재킷 두께)의 증가에 따라 내진 성능 수준이 향상되는 것으로 조사되었다. 중간 및 높은 위험 수준의 지진 시나리오에서 SR의 증가는 $CR \geq 0.2$ 의 범위에서 내진 성능 수준을 극대화하는 것으로 조사되었다. SR이 7.54이며 CR-I($CR < 0.07$)인 경우(예: 보강된 모델 RFD1) 내진 성능 수준이 낮게 산정되는 것은 낮은 CR 값에 따른 연성능력 부족에 의하여 변형 저항 능력이 낮기 때문으로 조사되었다.
- (3) 낮은 위험 수준 지진 시나리오에서 SR이 2.91에서 7.54로 증가함에 따라, 보강효과가 1.8배 상승하는 것으로 조사되었다. 중간 및 높은 위험 수준 지진 시나리오에서는 CR-I에서 CR-III로 증가함에 따라 보강효과가 1.54배 증가하는 것으로 조사되었다. $CR \geq 0.2$ 인 경우 평균 보강효과보다 1.4배 더 높은 보강효과를 보였지만, 이 범위에선 CR의 증가에 따른 큰 변화는 없었으며 SR 증가에 따라 보강효과가 향상되는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 FRP 재킷 보강 전략은 지진 시나리오에 따라 강성 및 연성에 대한 보강효과를 고려하여 설계하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원(2022-MOIS63-003) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 수행된 한국건설기술연구원 주요사업의 결과물임(No.20230146-001).

/ REFERENCES /

1. Hoffmann GW, Kunnath SK, Reinhorn AM, Mander JB. Gravity-load–designed reinforced concrete buildings: Seismic evaluation of existing construction and detailing strategies for improved seismic resistance. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Tech. Rep. c1992:92–0016.
2. Wright TR. Full-scale seismic testing of a reinforced concrete moment frame using mobile shakers. PhD thesis. Atlanta, GA (US): Georgia Institute of Technology; c2015.
3. Luccioni BM, López DE, Danesi RF. Bond–slip in reinforced concrete elements. *J Struct Eng.* 2005;131(11):1690–1698.
4. Sause R, Harries KA, Walkup SL, Pessiki S, Ricles JM. Flexural behavior of concrete columns retrofitted with carbon fiber reinforced polymer jackets. *ACI Struct J.* 2004;101(5):708–716.
5. Haroun MA, Elsanadedy HM. Fiber–reinforced plastic jackets for ductility enhancement of reinforced concrete bridge columns with poor lap–splice detailing. *J Bridge Eng.* 2005;10(6):749–757.
6. Shin J, Scott DW, Stewart LK, Yang C–S, Wright TR, DesRoches R. Dynamic response of a full–scale reinforced concrete building frame retrofitted with FRP column jackets. *Eng Struct.* 2016; 125:244–253.
7. Shin J, Jeon J–S, Wright TR. Seismic mobile shaker testing of full–scale RC building frames with high–strength NSM–FRP hybrid retrofit system. *Compos Struct.* c2019;226:111207.
8. Shin J. Forced Vibration Testing of Full–scale Non–seismic Reinforced Concrete Frame Structure Retrofitted Using FRP Jacketing System. *J Earthquake Eng.* 2018;22(5):281–289.
9. Mohammed AA, Manalo AC, Ferdous W, Zhuge Y, Vijay PV, Alkinani AQ, Fam A. State–of–the–art of prefabricated FRP composite jackets for structural repair. *Eng Sci Tech, An Int J.* 2020;23(5):1244–1258.
10. He R, Yang Y, Sneed LH. Seismic repair of reinforced concrete bridge columns: review of research findings. *J Bridge Eng.* 2015; 20(12):04015015.
11. Yang Y, Sneed L, Saiidi MS, Belarbi A, Ehsani Mo, He R. Emergency repair of an RC bridge column with fractured bars using externally bonded prefabricated thin CFRP laminates and CFRP strips. *Compos Struct.* 2015;133:727–738.
12. He R, Yang Y, Sneed LH. Post–repair seismic assessment of RC bridges damaged with fractured column bars—a numerical approach. *Eng Struct.* 2016;112:100–113.
13. Shin J, Jeon J, Kim J. Numerical Column Model for Damaged Non–ductile Reinforced Concrete Frame Repaired Using FRP Jacketing System. *J Earthquake Eng.* 2018;22(5):291–298.
14. Bracci JM, Reinhorn AM, Mander JB. Seismic resistance of reinforced concrete frame structures designed for gravity loads: performance of structural system. *ACI Struct J.* 1995;92(5):597–609.
15. Bracci JM, Reinhorn AM, Mander JB. Seismic retrofit of reinforced concrete buildings designed for gravity loads: performance of structural model. *ACI Struct J.* 1995;92(6):711–723.
16. El–Attar AG, White RN, Gergely P. Behavior of gravity load designed reinforced concrete buildings subjected to earthquake. *ACI Struct J.* 1997;94(2):133–145.
17. Mander JB, Priestley MJN, Park R. Observed stress–strain behavior of confined concrete. *ASCE J Struct Eng.* 1988;114(8):1827–1849.
18. Xiao Y, Wu H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *J Mater Civil Eng.* 2000;12(2):139–146.
19. Kim H, Hong W, Lee H. The Flexural Behavior of a Square Concrete Filled Carbon Tube Columns under the Constant Axial Force with Reversed Cyclic Lateral Load. *J Earthquake Eng.* 2004;8(4):1–10.
20. Haroun MA, Mosallam AS, Feng MQ, Elsanadedy HM. Experimental investigation of seismic repair and retrofit of bridge columns by composite jackets. *J Reinf Plast Compos.* 2003;22(14):1243–1268.
21. Livermore Software Technology Corporation. LS–DYNA Keyword User’s Manual Version 971/R7.0. Livermore, CA (US); c2013.
22. Shin J, Stewart LK, Yang C–S, Scott DW. Implementation of bond–slip performance models in the analyses of non–ductile reinforced concrete frames under dynamic loads. *J Earthquake Eng.* 2020;24(1):129–154.
23. Seible F, Priestley MJN, Hegemier GA, Innamorato D. Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets. *J Compos Constr.* 1997;1(2):52–62.
24. Ma R, Xiao Y, Li KN. Full–scale testing of a parking structure column retrofitted with carbon fiber reinforced composites. *J Construct Building Mater.* 2000;14(2):63–71.
25. ElGawady M, Endeshaw M, McLean D, Sack R. Retrofitting of rectangular columns with deficient lap splices. *J Compos Constr.* 2010;14(1):22–35.
26. Li G, Kidane S, Pang S–S, Helms JE, Stubblefield MA. Investigation into FRP repaired RC columns. *Compos Struct.* 2003;62(1):83–89.
27. Berthet JF, Ferrier E, Hamelin P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study. *Constr Build Mater.* 2005;19(3):223–232.
28. Ozbakkaloglu T. Compressive behavior of concrete–filled FRP tube columns: Assessment of critical column parameters. *Eng Struct.* 2013;51:188–199.
29. Mohammed AA, Manalo AC, Maranan GB, Zhuge Y, Vijay PV. Comparative study on the behaviour of different infill materials for pre–fabricated fibre composite repair systems. *Constr Build Mater.* 2018;172:770–780.
30. Shin J, Jeon JS, Wright TR. Full–Scale Shaker Testing of Non–Ductile RC Frame Structure Retrofitted Using High–Strength Near Surface Mounted Rebars and Carbon FRP Sheets. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea.* 2019;23(1):43–54.
31. ACI Committee 318. Building code requirements for reinforced concrete. ACI 318–63, Farmington Hills, American Concrete Institute, Detroit, MI (US); c1963.
32. Shin J, Stewart LK, Yang CS, Scott DW. Implementation of Bond–Slip Performance Models in the Analyses of Non–Ductile Reinforced Concrete Frames Under Dynamic Loads. *Journal of*

- Earthquake Engineering, 2020;24(1):129–154.
33. ATC-40. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building. Applied Technology Council (ATC), Redwood City, CA (US); c1996.
 34. FEMA-274. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Rep. No. FEMA-274, Federal Emergency Management Agency (FEMA): Washington, DC(US); c1997.
 35. Freeman SA, Nicoletti JP, Tyrell JV. Evaluations of existing buildings for seismic risk—A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington. Proceedings of the 1st U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1975;113–122.
 36. FEMA-356. Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, prepared by ASCE, Rep. No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency (FEMA): Washington, DC(US); c2000.
 37. Park YJ, Ang A HS, Wen YK. Damage-limiting a seismic design of buildings. Earthquake Spectra, 1987;3(1):1–26.
 38. Kunnath SK, Reinhorn AM, Park YJ. Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures. J Struct Eng. 1990; 116(4):996–1017.
 39. Jeong SH. Experimental and analytical seismic assessment of buildings with plan irregularities. University of Illinois at Urbana-Champaign; c2005.
 40. Güneysi EM, Altay G. Seismic fragility assessment of effectiveness of viscous dampers in R/C buildings under scenario earthquakes. Struct Saf. 2008;30(5):461–480.
 41. Seifi A, Hosseini A, Marefat MS, Zareian MS. Improving seismic performance of old-type RC frames using NSM technique and FRP jackets. Eng Struct. 2017;147:705–723.
 42. Kim J. Energy-Based Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Structures I – Flexural Components. 1999;3(3):33–44.
 43. Shin J. Multi-hazard performance criteria for non-ductile reinforced concrete frame buildings retrofitted with an FRP column jacketing system. PhD thesis. Atlanta, GA (US): Georgia Institute of Technology; c2017.
 44. Shin J, Scott DW, Stewart LK, Jeon J-S. Multi-hazard assessment and mitigation for seismically-deficient RC building frames using artificial neural network models. Eng Struct. 2020;207:110204.
 45. Lee CS, Hegemier GA, Phillippi DJ. Analytical model for fiber-reinforced polymer-jacketed square concrete columns in axial compression. ACI Struct J. 2010;107(2):208–217.
 46. Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, Echary HE, Mastrapa JC, Pico O. Effect of column parameters on FRP-confined concrete. J Compos Constr. 1998;2(4):175–185.
 47. Spoelstra MR, Monti G. FRP-confined concrete model. J Compos Constr. 1999;3(3):143–150.