

연속지진에 대한 지진 취약 철근콘크리트 건축물의 FRP 재킷 보수 전략 연구

Repair Scheme of FRP Column Jacketing System for Seismically-vulnerable RC Buildings under Successive Earthquakes

김수빈*
Kim, Subin

김혜원**
Kim, Haewon

박재은***
Park, Jaeun

신지욱****
Shin, Jiuk

Abstract

Existing reinforced concrete (RC) frame buildings have seismic vulnerabilities because of seismically deficient details. In particular, since cumulative damage caused by successive earthquakes causes serious damage, repair/retrofit rehabilitation studies for successive earthquakes are needed. This study investigates the repair effect of fiber-reinforced polymer jacketing system for the seismically-vulnerable building structures under successive earthquakes. The repair modeling method developed and validated from the previous study was implemented to the building models. Additionally, the main parameters of the FRP jacketing system were selected as the number of FRP layers associated with the confinement effects and the installation location. To define the repair effects of the FRP jacketing system with the main parameters, this study conducted nonlinear time-history analyses for the building structural models with the various repairing scenarios. Based on this investigation, the repair effects of the damaged building structures were significantly affected by the damage levels induced from the mainshocks regardless of the retrofit scenarios.

Keywords : *Successive Earthquakes, Repaired-FRP, Seismically-vulnerable RC Buildings*

1. 서론

내진 설계가 적용되기 이전의 기존 철근콘크리트 (Reinforced Concrete, RC) 건축물은 지진에 취약하다. 주요 구조 부재 중 하나인 기둥 내의 띠철근의 넓은 간격 배치, 겹침이음의 짧은 길이 등 부적합한 철근상세에

의하여 특히, 비연성 철근콘크리트 건축물은 연속지진이 발생했을 때 심각한 피해가 발생한다(Bracci et al., 1995; Beres et al., 1996; El-Attar et al., 1997). 예를 들어 뉴질랜드에서 2010년과 2011년 사이에 약 10개월 내에 연속지진이 발생하였다(2010년 9월 4일 Mw 7.1 Darfield 지진, 2011년 2월 22일 Mw 6.2 Christchurch 지진, 2011년 6월 13일 Mw 6.2 2차지진). 1차 지진에 의해 중간 수준의 피해를 입은 후, 2차 지진이 발생했을 때 손상누적으로 3층 RC 골조 내 기둥에서 전단 파괴가 발생하였다. 3차 지진이 발생했을 때 손상된 건축물이 완전히 붕괴되었다(Kam et al., 2011). 또한 일본의 Kumamoto시에서 2016년 4월 14일과 2016년 4월 16일에 규모 6.5의 지진(1차 지진)과 규모 7.3의 지진(2차 지진)이 발생하였다. 해당 지진에 의해 비연성 RC 건축물은 낮은 내진성능 때문에 부분적으로 또는 완전히 붕괴되었다(Morita & Takayama, 2017). 연속지진에 의한 누적 손상은 심각한 피해를 발생시킬 수 있으므로, 연속 지진에 대한 보수/보강에 대한 효과를 검증 또는 정량화 하는 연구가 필요하다(Aschheim&Black, 1999; Leborgne,

* 학생회원, 경상국립대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University
E-mail: subin8758@naver.com
** 정회원, 국립재난안전연구원, 지진방재센터, 공학박사
Earthquake Hazards Reduction Center, National Disaster Management Research Institute
E-mail: kimhw0114@korea.kr
*** 정회원, 국립재난안전연구원, 지진방재센터, 공학박사
Earthquake Hazards Reduction Center, National Disaster Management Research Institute
E-mail: jaeunpark@korea.kr
**** 교신저자, 정회원, 경상국립대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Gyeongsang National University
Tel: 055-772-1754 Fax: 055-772-1759
E-mail: jiukshin@gnu.ac.kr

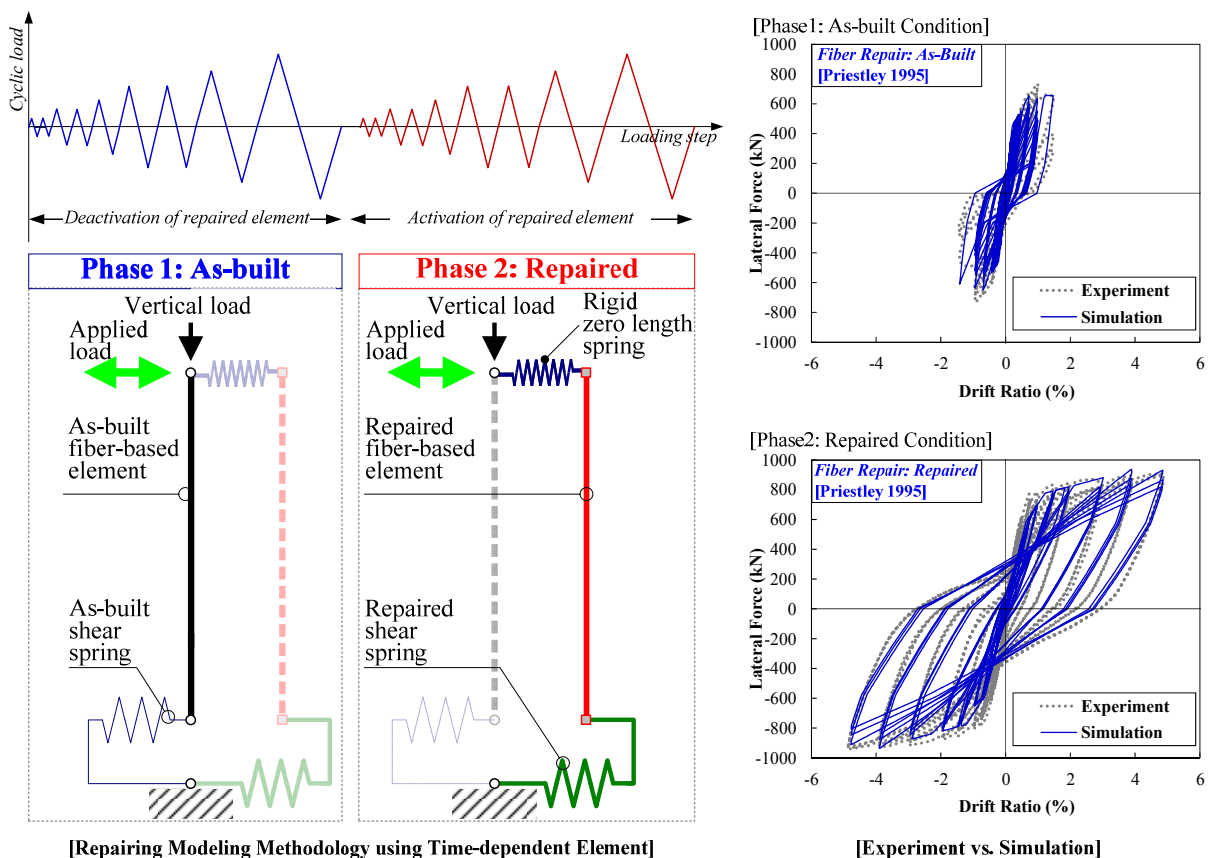
2012; Fakharifar et al., 2015; Jeon et al., 2015).

기존 철근콘크리트 건축물의 기둥의 전단파괴를 방지하기 위해 FRP(Fiber-Reinforced polymer)를 사용한 내진 보강 및 보수 공법이 사용되었다. 이전의 실험 연구는 FRP 재킷 보강이 추가적인 구속력을 제공하여 기둥의 전단 성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다 (Seible et al., 1995 & 1997; Xiao et al., 1999; Patel, 2000; Sause et al., 2004; You et al., 2012). 이전의 Aschheim & Black(1999)에 의하여 수행된 수치 연구는 보수 시스템의 적용이 2차 지진으로 인한 추가 건축물 손상을 최소화할 수 있다는 것이 확인되었다. 그러나 해당 연구는 1차 지진에 대한 손상을 예상되는 손상 수준 측면에서 철근의 초기 강성을 감소시켜 기둥을 모델링하였기 때문에, 1차 지진에 의해 발생한 잔류변형을 정확히 고려할 수 없다.

1차 지진에 의한 잔류변형 등을 보다 정확히 반영하여 연속지진에 대한 건축물의 보수/보강 효과를 평가하기 위하여 ZeusNL의 시간종속요소(time-dependent element)를 고려할 수 있다(Elnashai et al., 2001). 시

간종속요소는 사용자가 요소의 활성화시간과 비활성화 시간을 정의하여 정의된 시간 내에서 활성화 혹은 비활성화되어 시간이력해석을 수행하는 중간에 부재의 영향을 결과에 반영시킬 수 있다. 해당 시간종속요소를 활용하여 Shin et al.(2018)은 1차 지진에 의한 보수 전에 발생된 초기 손상을 유지한 채로 연속적으로 2차 지진이 발생했을 때 FRP가 보수된 요소를 활성화시키기 위한 FRP 보수 모델링 기법을 제안하였으며, 해당 모델링 기법을 과거 실험 연구 결과와 검증하였다.

본 연구의 목적은 시간종속요소 기반의 FRP 보수 모델링 기법을 활용하여 연속지진에 대한 지진 취약 RC 골조 건축물의 보수 효과를 조사하는 것이다. 이를 위하여 FRP 재킷 시스템의 주요 변수 중 하나인 FRP 재킷 두께(구속 효과 고려) 및 설치 위치(설치 수량)를 고려하였다. 또한 과거에 발생된 총 10개의 연속지진세트를 선정하여 본 연구에서 고려된 RC 건축물에 대한 비선형 시간이력해석을 실시하였으며, 여기서 계산된 동적 응답을 바탕으로 연속지진에 대한 보수 효과를 정량화하였다.



〈Fig. 1〉 FRP column jacketing modeling method with time-dependent element

〈Table 1〉 Summary of repaired columns

Column detail	Section Type	C
	Aspect ratio	4.0
	f'_c (MPa)	34.5
	f_y (MPa)	324
	ρ_t (%)	0.2
	ρ_l (%)	2.5
FRP jacket detail	f_j (MPa)	88
	t_j (mm)	3.9

2. FRP 기둥 보수 모델링 방법

본 절에서는 비보강(As-built) 및 보수된(Repaired) 기둥에 대한 수치 해석 모델 개발과 검증에 대하여 기술하였으며, 각 해석 모델에 대한 해석 결과는 과거 수행된 실험 결과와 비교하여 검증하였다. 본 연구에서는 비보강 기둥의 손상상태와 FRP 보수 성능 향상을 묘사할 수 있는 FRP-보수 기둥의 수치 모델링 기법을 사용하였다.

〈Fig. 1〉는 FRP-보수 기둥의 수치 해석 모델을 보여준다. Karayannis & Sirkelis(2008)은 에폭시 주입 등이 손상된 기둥의 초기 성능까지 회복할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다. 이 실험 결과에 따라, 시간종속요소를 활용한 모델링 기법은 1차 하중에 대한 비보강 기둥 모델과 2차 하중에 대한 FRP-보강 기둥 모델을 하나의 해석모델로 조합하였다. 해당 모델은 1차 하중(Phase-1)동안 비보강 파이버 요소(As-built fiber-based element)와 비보강 전단 스프링(As-built shear spring)이 활성화되어 비보강 상태에 대한 거동을 묘사하며, 2차 하중(Phase-2)발생 시 비보강 요소는 비활성화되며 FRP로 보수 파이버 요소(Repaired fiber-based element), 보수 전단 스프링(Repaired shear spring) 및 Rigid 스프링이 활성화되어 보수된 상태의 거동을 모델링할 수 있다. 여기서 보수 전단 스프링 요소는 적용되는 FRP 재료, layer 두께 등을 고려하여 향상된 전단성능을 기반으로 모델링하여 해당 기둥의 휨 거동을 유도하였다. Zeus-NL은 파이버 요소에만 시간 의존성을 사용할 수 있기 때문에 보수된 전단 스프링은 1차 하중단계에서 사용된다. 그러나 보수된 전단 스프링과 Rigid 스프링은 보수된 전단 스프링과 연결된 보수된

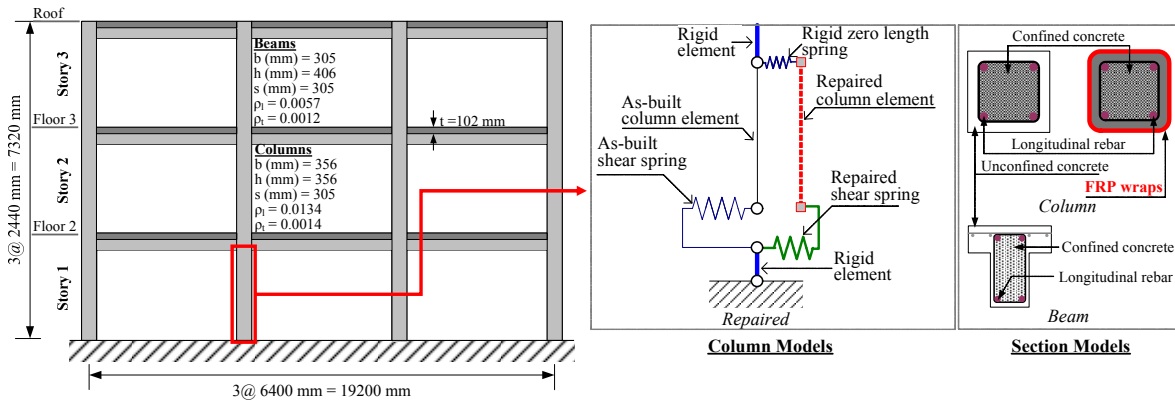
요소가 활성화되지 않기 때문에 1차 하중동안 비보강 기둥의 시뮬레이션 응답에 영향을 미치지 않는다. 제안된 모델링 기법은 1차 하중과 관련된 잔류변형 영향을 고려한 상태로 2차 하중에 대한 해석을 실시할 수 있다. 상기 언급된 모델링 기법을 검증하기 위하여 Shin et al.(2018)은 과거 지진 취약 상세를 갖는 RC 기둥에 대한 연속 하중에 따른 FRP 보수효과평가를 위해 수행된 실험 결과와 비교하였다. 본 논문은 Priestley & Seible(1993)에 의해 수행된 실험 결과에 대하여 검증 예시로 언급하였으며, 자세한 검증과정은 Shin et al.(2018)을 참고할 수 있다. 과거 실험체에 대한 정보는 〈Table 1〉을 참고할 수 있다. 〈Fig. 1〉는 원형 단면 실험 기둥에 대한 실험결과와 수치 해석을 통해 나타난 1차 하중과 2차 하중에 대한 하중-변위 이력곡선을 비교한 것이다. 실험과 해석 결과에서 최대 강도를 비교했을 때 2차 하중단계에서 10% 이내 차이를 보였다. FRP 보수된 기둥 모델은 Priestley & Seible(1993)에서 측정된 실험 결과보다 약 16.2%정도 낮은 에너지 소산량을 생성한다. 이러한 차이는 Vecchio & Collins(1986)에 의해 제시된 수정 압축장 이론(modified compression field theory, MCFT) 기반으로 산정된 전단 강도가 다소 과소평가되었기 때문이다. 이에 따라, 해당 모델링 기법은 강도, 강성 저하 및 에너지 소산능력 측면에서 적절하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 3층 비연성 RC 골조 모델

3절은 본 논문에서 FRP 재킷의 보수 효과를 조사하기 위하여 활용한 3층 비연성 RC 골조 모델에 대한 수치 해석 모델과 FRP 재킷 시스템의 주요 변수를 설명한다. 그리고 본 연구에서 사용된 연속지진세트를 언급하였다.

3.1 비연성 RC 건물 모델 개요

본 연구에서는 〈Fig. 2〉과 같이 Kurama(1996)이 설계한 3층, 3경간 비연성 RC 골조를 기준 건물 골조로 선정하였다. 해당 골조는 ACI (American Concrete Institute) 318-63 (1963)에 따라 중력 하중만을 위해 설계되어있으므로 비내진 상세를 갖는 부재로 인해 1층



〈Fig. 2〉 3-story non-ductile RC frame model

기둥의 전단파괴에 의해 지배적이다. 〈Fig. 2〉에는 기둥 및 보 세부사항에 대한 간략한 정보를 포함한다. 그림에서 b 는 부재의 폭, h 는 부재의 깊이, s 는 전단철근의 간격, ρ_l 는 축방향철근비 그리고 ρ_t 는 횡방향철근비를 의미하였다. 그림에 제시된 부재의 세부 정보를 바탕으로 ZeusNL을 활용하여 RC 건축물 골조의 기본 모델링을 수행하였으며, 〈Fig. 2〉에 제시된 것과 같이 시간중속요소기반의 FRP 보수 모델링 기법을 골조 내 각 기둥에 적용하였다. 여기서 보-기둥 접합부는 Rigid 접합부로 가정하였다. 콘크리트의 압축강도(f_c)는 26 MPa, 철근의 항복강도(f_y)는 303 MPa, 철근의 항복 후 강성비는 0.008로 가정하였다. 고정하중은 콘크리트 재료의 밀도 (2400kg/m^3)를 가정하여 각 요소의 단면과 요소 길이를 기준으로 계산하였으며, 활하중은 Kurama(1996)에서 사용한 것과 동일하게 적용하였다.

3.2 FRP 재킷 파라미터

본 연구는 선행 연구에 기초하여 (1) FRR 두께, (2) FRP 보수 위치를 주요 파라미터로 결정한다. FRP 두께가 증가하면 추가적인 구속력이 상승하고, 구속계수 (confinement factor, CF)가 향상되어 콘크리트 강도 및 연성 능력이 증가하므로 FRP 두께를 주요 파라미터로 선정하였다. 여기서 CF는 구속 콘크리트 강도 (confinement concrete strength, f_{cc})와 콘크리트 압축 강도의 비율로 정의된다. FRP 두께는 Seible et al.(1995 & 1997)이 제안한 보강 설계 프로세스에 따라 결정하였다. 이 설계 프로세스는 과거의 실험연구를 통해 검증되었으며, 지진 성능을 개선하기 위해 FRP 재킷

시스템을 사용한 기둥 보강/보수에 대한 과거 연구에서 널리 사용되어왔다(Sause et al., 2004; Ozcan et al., 2008; Shin et al., 2016). 본 연구에서는 탄성계수(E), 극한강도(f), 겹 당 두께(t_j)는 각각 29,056 MPa, 814 MPa, 그리고 2.54 mm로 가정하였으며, 여기서 한 겹 (one-layer)과 두 겹(two-layer)으로 구성된 FRP 재킷의 f_{cc} 값은 각각 f_c 의 1.5배와 2.0배로 계산되었다 (Saadatmanesh et al., 1997). 여기서 one-layer 및 two-layer FRP 재킷에 대한 목표 변위 연성 능력 (displacement ductility capacity)은 각각 비보강 기둥의 약 2~3배 높은 것으로 가정하였다(Shin et al., 2016). FRP layer 수에 따른 보수 전단 스프링의 입력 값은 MCFT 기반 단면해석 시 콘크리트의 재료 강도를 FRP 구속 콘크리트 모델(Lee et al., 2010)을 통하여 산정된 콘크리트 재료의 압축응력-변형율의 관계를 적용하여 계산할 수 있다. 또한, FRP 보수 위치도 해당 연구에서 주요 변수로 선정하였다. 지진에 취약한 비보강 RC 골조는 연층 현상에 의해 특정 층에 손상이 집중되기 때문에 보수 위치에 따라 층별 지진 에너지 분배 비율 혹은 수준에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 FRP 위치에 따른 보수 전략은 골조 시스템의 응답에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 〈Fig. 3〉는 본 연구에서 고려된 층별 FRP 보수 위치를 보여준다. 그림의 보수 골조 모델에 대하여 n -layer의 FRP 재킷을 활용하였다. 또한 〈Table 2〉의 "Repair-Epoxy"는 에폭시 주입만으로 보수된 비보강 골조 모델로 앞서 언급한 것과 같이 에폭시주입은 기둥의 초기 상태를 회복할 수 있으므로, 비보강 전단 스프링(As-built shear spring)을 보수된 전단 스프링 (Repaired shear spring)으로 활용하였다.

〈Table 2〉 Parametric models for repair schemes

Group	Models	Main parameters of FRP			Retrofit and repair story level (S)
		Earthquakescenario	Number of layers (N)	Confinement factor (CF)	
As-built	As-built	Mainshock (MS) + Aftershock (AS)	None	1.02	None
	Repair-Epoxy		None	1.02	Epoxy injection
FRP-Repaired	Repair-N1-S1		1	1.50	First-story
	Repair-N1-S2		1	1.50	First and second stories
	Repair-N1-S3		1	1.50	All stories
	Repair-N2-S3		2	2.00	All stories

3.3 연속지진하중

연속적인 지진의 영향을 받는 비내진 RC 골조 모델의 동적 응답에 대한 FRP 보수 효과를 조사하기 위해, PEER 데이터베이스에서 10세트의 연속지진을 생성하였다(PEER, 2013). 동일한 관측소에서 기록된 두 개의 지진을 조합하였으며, 이전의 기록은 1차 지진(mainshock)으로 가정하였다. 이 연구에 사용된 연속적인 지진기록에 대한 자세한 내용은 Shin et al.(2014)을 참고할 수 있다. 본 연구는 두 가지 유형의 연속지진 조합으로 다음과 같이 구성하였다.

- (1) 짧은 시간 간격의 동일한 위치에서 발생하는 1차 지진-2차 지진 기록(예: R1 및 R10)
- (2) 긴 시간 간격을 두고 동일한 관측소에서 측정된 1차 지진-2차 지진 기록(예: R2에서 R9까지)

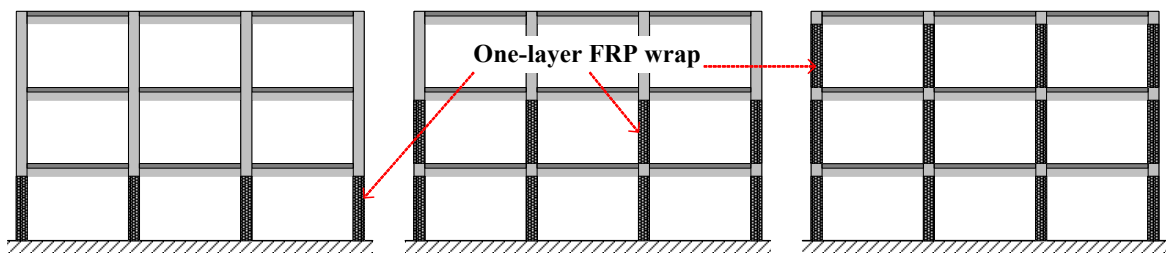
본 연구에 사용된 1차 지진-2차 지진 시퀀스는 1차 지진과 2차 지진 사이에 충분한 시간 간격(약 10초)을 가질 수 있도록 설정하였으며, 이 때 지반 가속도는 0g으로 가정하였다. 이는 1차 지진 하에서 골조 모델의 자유 진동을 유도하고 2차 지진이 발생하기 전에 1차 지진 잔류 응답을 유지하기 위한 것이다.

4. 연속지진 FRP 보수효과 분석

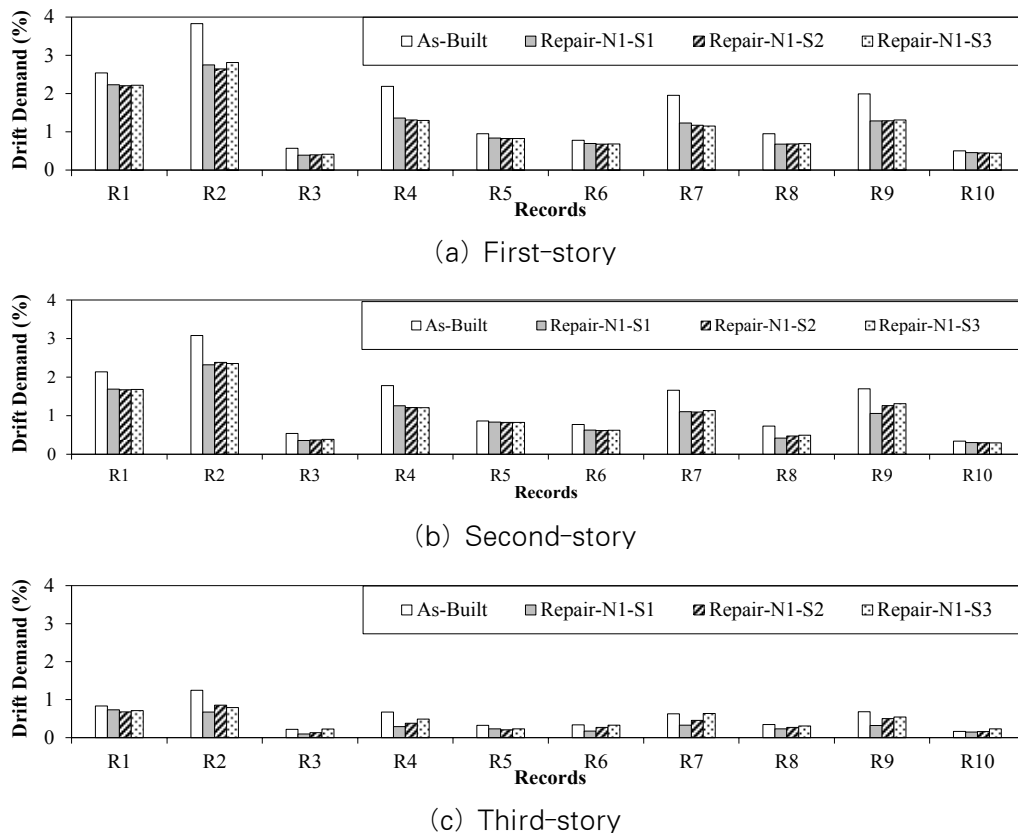
4.1 FRP 설치 위치

본 절은 본 연구에서 고려된 주요 변수 중 FRP 재킷의 보강위치(Repair-N1-S1, Repair-N1-S2 그리고 Repair-N1-S3)에 따른 연속지진에 대한 동적응답을 조사하고, 비보강 상태(As-built)에 대한 동적응답과의 비교를 통하여 설치 위치에 따른 보수 효과를 검토하였다.

〈Fig. 4〉는 각 층의 FRP 재킷으로 보수된 골조모델에 대하여 본 연구에서 고려된 10개의 연속지진세트에 대한 층간변위를 제시한 것으로, 비교를 위하여 비보강 골조 모델에 대한 최대 층간변위비를 함께 나타냈다. 전반적으로 설치 위치와 관계없이 1차 지진(본진)에 의해 건축물에 누적 손상이 발생하여도, 2차 지진(연속지진) 발생 시 FRP 재킷 보수를 통하여 최대 층간변위를 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 연속지진의 특성에 따라 FRP 재킷 보수에 의한 1층 최대 층간변위비의 변위저감 효과는 최대 37.9%에서 최소 8.9%로 나타났으며, 평균 24.4%의 변위저감 효과(As-built 모델 대비 Repair-N1-S1 모델 기준)를 보여주었다. 이러한 변위저감 효과의 차이는 1차 지진(본진)에 의한 손상 수준에



〈Fig. 3〉 FRP repair locations



〈Fig. 4〉 Maximum aftershock drift demand with different story-related repair strategies

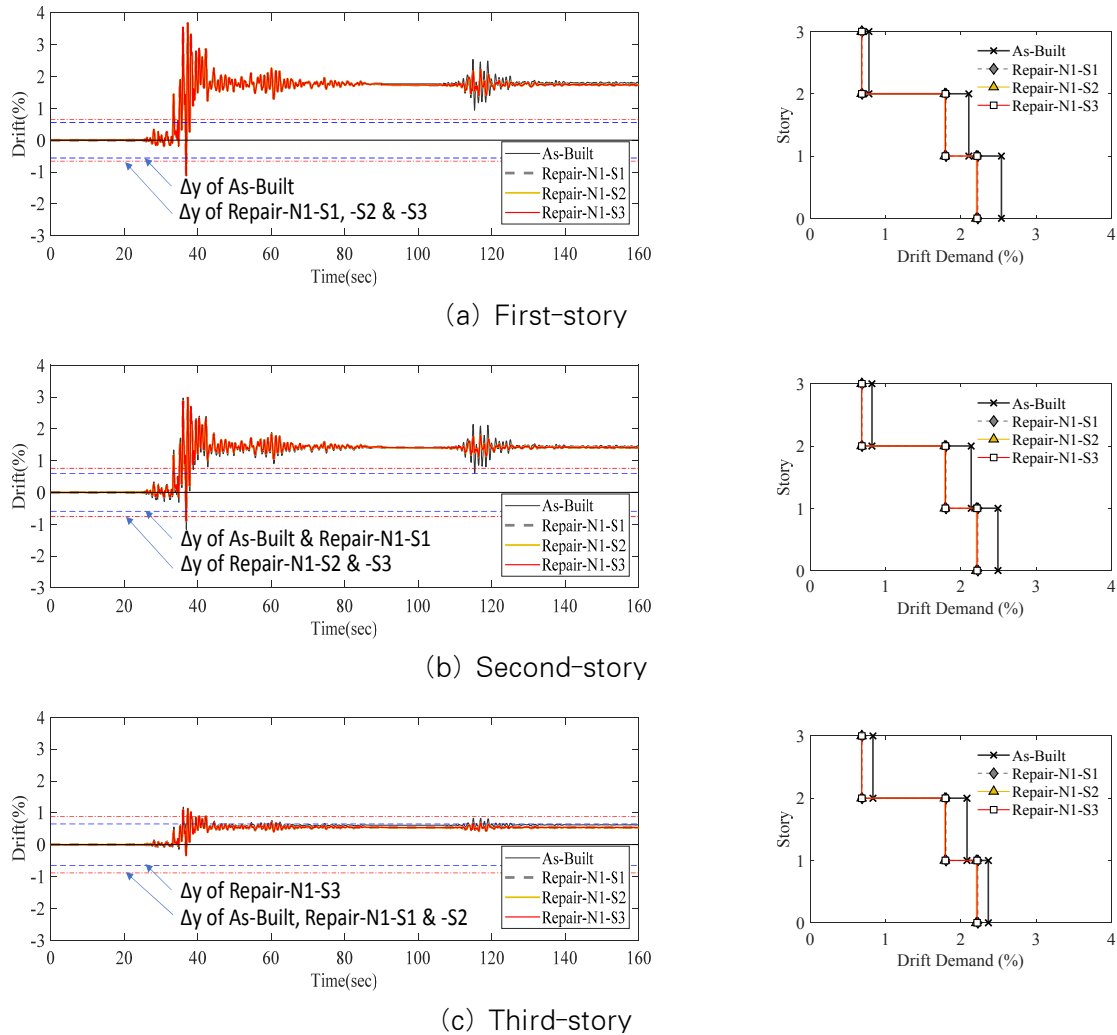
〈Table 3〉 Maximum and residual drift limit states specified in FEMA(FEMA,2003)

Damage level	Maximum drift limit (%)	Damage description
Immediate occupancy (IO)	≤1.0	Minor hairline cracking, limited yielding possible at a few locations, and no crushing
Life safety (LS)	≤2.0	Minor spalling in non-ductile columns
Collapse prevention (CP)	≤4.0	Extensive spalling in columns and buckling of some reinforcing rebars

따라 다르게 나타난 것으로 사료된다. 즉, 1차 지진에 의한 손상이 연속하여 발생하는 2차 지진에 대한 보수 효과에 영향을 미친 것이다. 예를 들어 〈Table 3〉에 제시된 연속지진세트 중 R3, R4, R7 그리고 R9에 대한 1차 지진에 의한 비보강 상태의 최대 층간변위비는 1.0% 미만으로 나타났다. 이는 〈Table 3〉에 제시된 모멘트에 대한 층간변위비 기반 성능 수준에 따르면 IO-level로 최대 37.9%에서 최소 31.9%의 변위저감 효과를 보여주었다. 주요 변수로 고려된 FRP 재킷의 설치 위치에 따른 변위저감 효과과는 고려된 모든 연속지진에 대하여 미

세한 차이를 보였다.

〈Fig. 4〉의 (a)부터 (c)까지의 As-Built 모델의 최대 층간변위에 대한 분포를 통하여 1층에 변위가 집중된 것을 볼 수 있으며, 설치 위치에 따른 변위저감 효과를 고려했을 때 1차 지진에 대하여 최대 층간변위비가 발생한 1층(최대 손상 발생 지점)에 FRP 재킷을 설치하는 것이 설치 수를 최소화하기 위한 효율적인 보수전략으로 판단된다. 시간종속요소 기반의 FRP 재킷 보수 모델의 적용에 의해 1차 지진에 의해 발생한 잔류변형을 그대로 유지하면서 2차 지진에 대한 보수 효과(변위저감

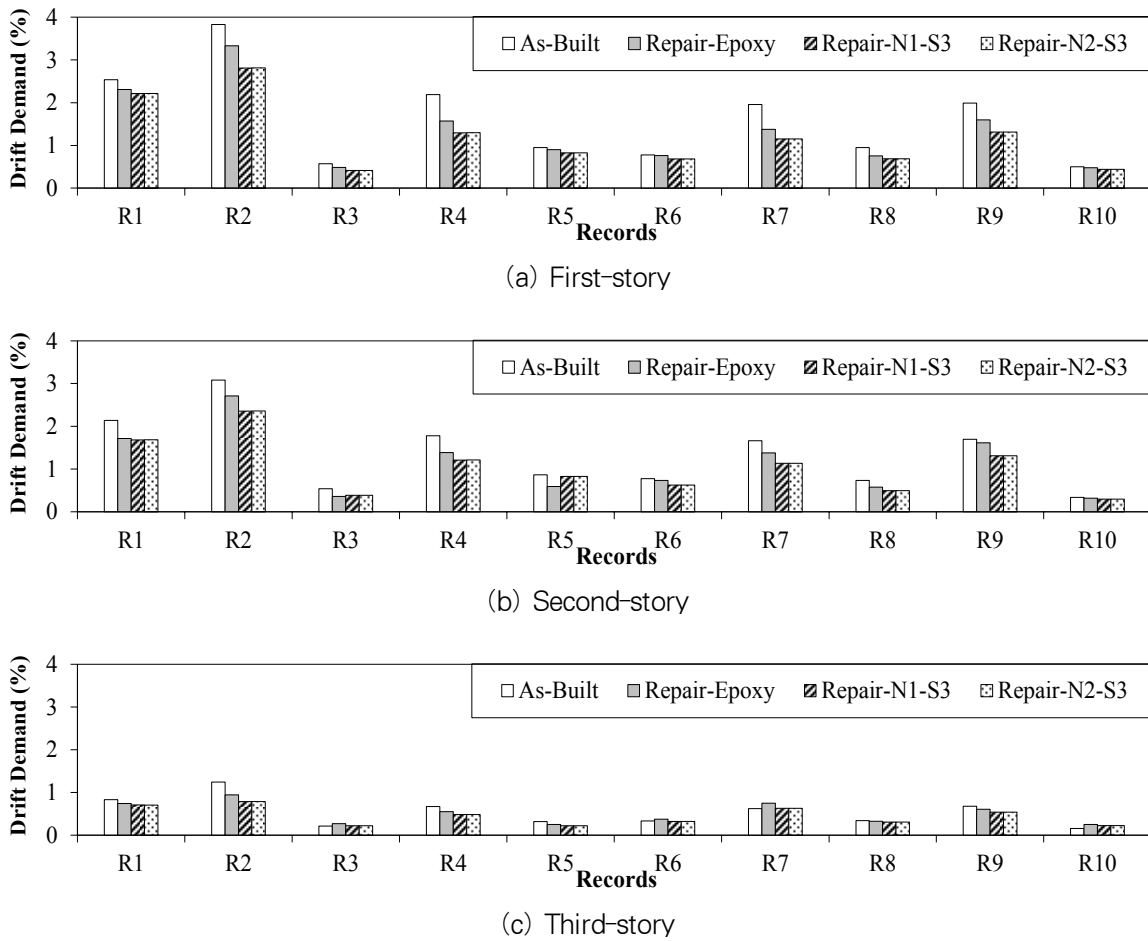


〈Fig. 5〉 Mainshock-aftershock drift of the as-built and repaired frame models under R1

효과)를 보여주기 위한 목적으로, 한 개의 연속지진을 선택하여 FRP 재킷 설치 위치에 따른 시간-변위 이력 그래프와 최대 층간변위비를 제시하였다.

〈Fig. 5〉은 R1 연속지진(본진-여진)에 대한 비보강 및 FRP 재킷이 설치된 골조 모델의 1층부터 3층까지의 시간에 따른 변위 응답을 보여준다. 그림의 왼쪽은 각 층의 FRP 재킷 설치 위치(Repair-N1-S1에서 Repair-N1-S3까지)에 따른 시간-변위 이력을 나타낸 것이며, 비교를 위하여 As-Built 모델에 대한 이력을 함께 제시하였다. 그림의 오른쪽은 2차 지진에 대하여 각 층에서 최대변위비가 발생한 시점(t_1 : 1층에서 최대변위비가 발생한 시점, t_2 : 2층에서 최대변위비가 발생한 시점 그리고 t_3 : 3층에서 최대변위비가 발생한 시점)에서의 최대 층간변위비를 나타낸 것이다. 〈Fig. 5〉의 왼쪽

편(시간-변위비 이력)을 살펴보면 모든 층에 대하여 비보강 및 FRP 재킷이 설치된 보수 모델은 1차 지진에 대한 잔류변형에 의하여 2차 지진 발생 시 한쪽으로 치우쳐서 건축물이 거동하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림에 제시된 것과 같이 1차 지진에 의하여 각 층의 주요 구조부재(기둥)의 항복변위(Δ_y)를 초과하는 것으로 나타났기 때문에 상당한 잔류변형이 발생했기 때문이다. 또한 앞에서 언급한 것과 같이 2차 지진에서 FRP 재킷이 활성화되어 변위비가 감소(Fig. 5의 왼쪽)하는 것을 볼 수 있으며, 〈Fig. 5〉의 오른쪽에 제시된 것과 같이 FRP 재킷 보수 위치에 따른 변위 저감효과는 미세한 것으로 나타났다.



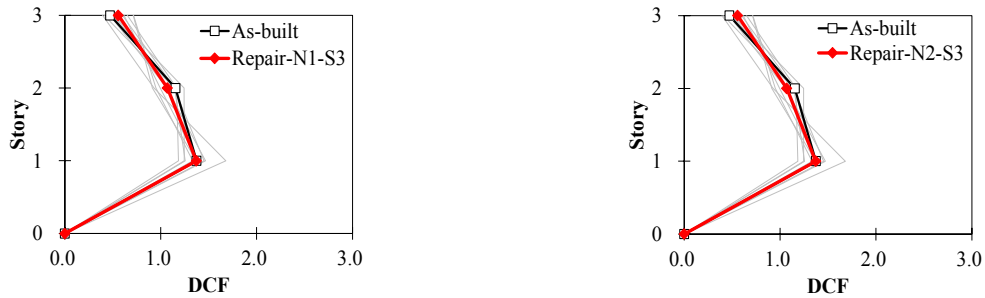
〈Fig. 6〉 Maximum aftershock drift demand with number of FRP layers

4.2 FRP 두께

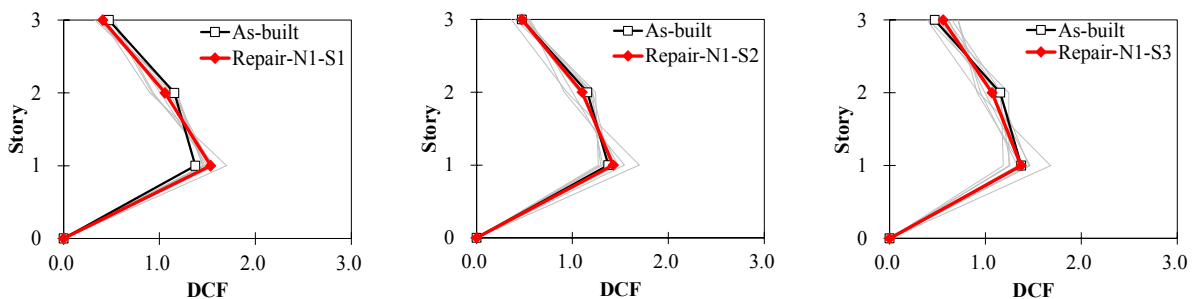
본 절은 본 연구에서 고려된 주요 변수 중 FRP 재킷의 두께(Repair-Epoxy, Repair-N1-S3 그리고 Repair-N2-S3)에 따른 연속지진에 대한 동적응답을 조사하고, 비보강 상태에 대한 동적응답과의 비교를 통하여 두께에 따른 보수 효과를 검토하였다.

〈Fig. 6〉은 FRP 두께와 관련하여 FRP 보수가 2차 지진 응답에 미치는 영향을 검토하기 위해 비보강 골조와 보수 골조에 대한 최대 층간변위비를 제시하였다. 전반적으로 두께와 관계없이 1차 지진에 의해 건축물에 누적 손상이 발생하여도, 2차 지진발생 시 FRP 재킷 보수를 통하여 최대 층간변위비를 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 연속지진의 특성에 따라 FRP 재킷 보수에 의한 1층 최대 층간변위비의 변위저감 효과는 최대 41.2%에서 최소 12.2%로 나타났으며, 평균 24.8%의 변위저감 효과(As-built 모델 대비 Repair-N1-S3,

Repair-N2-S3 모델 기준)를 보여주었다. 이러한 변위저감 효과의 차이는 4.1절에서 언급한 것과 같이 1차 지진에 의한 손상 수준에 의해 결정된 것으로 보인다. 예를 들어 연속지진세트 중 R3, R4, R7 그리고 R9에 대한 1차 지진에 의한 비보강 상태의 최대 층간변위비는 1.0% 미만으로 나타났다. 이는 〈Table 3〉에 제시된 층간변위비 기반 성능 수준에 따르면 IO-level로 최대 41.1%에서 최소 27.1%의 변위저감 효과를 보여주었다. 주요 변수로 고려된 FRP 재킷의 두께에 따른 변위저감 효과는 고려된 모든 연속지진에 대하여 차이가 미미하다. 따라서 보수 설계 시 요구되는 구속력이 만족한다면 일정 FRP 두께 이상의 설치는 불필요하다고 판단된다.



(a) Repair-N1-S3 (b) Repair-N2-S3
 <Fig. 7> DCF(Drift Concentration Factor) for as-built and repaired frame



(a) Repair-N1-S1 (b) Repair-N1-S2 (c) Repair-N1-S3
 <Fig. 8> DCF(Drift Concentration Factor) for as-built and repaired frame

4.3 DCF 효과

각 층별 층간변위비의 분포도를 나타내기 위하여 DCF(Drift Concentration Factor)를 사용하였다. 각 층별 DCF가 1.0을 가지면 전체 건축물의 층간 변위비가 고르게 분포된 것을 의미하기 때문에 전체 건축물에 균등한 손상 분포를 의미한다. 이와 반대로 특정 층의 DCF값이 1.0보다 매우 높을 경우 해당 층에 손상이 집중되는 것을 의미하므로 건축물이 연층현상에 의해 지배되는 거동을 하는 것으로 판단하였다. 각 층별 DCF는 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$DCF_i = (\Delta_i / h_i) / (\delta_{roof} / H) \quad (1)$$

여기서, DCF_i 는 i -층에 대한 DCF 값을 나타낸 것이며, Δ_i 는 각층의 층간 변위비, δ_{roof} 는 건물의 전체 변위, h_i 는 각 층의 높이 그리고 H 는 전체 건축물의 높이를 의미한다.

<Fig. 7>은 FRP 재킷의 두께(Repair-N1-S3, Repair-N2-S3)에 대한 비보강 골조와 FRP-보수된 골조의 각

층에 대한 DCF값을 나타낸 것이다. 비보강 골조와 FRP-보수된 골조의 각 층에 대한 DCF를 비교하였을 때, 전반적으로 10개의 연속지진에 대한 각 층별 DCF의 평균값은 비보강 상태와 크게 다르지 않은 것을 볼 수 있다. 10개 지진하중에 대한 평균값을 살펴보면, DCF가 최대값인 1층은 미세한 차이(0.1%)를 보였으나 3층의 DCF는 약 18.0% 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 <Fig. 5>에 제시된 층간변위비의 분포에서 나타난 것과 같이 1층 기둥에 손상이 집중되었기 때문에 FRP 재킷 보수에 의한 DCF 저감효과가 미미한 것으로 나타났다. 그러나 1차 지진에 의한 손상이 크지 않은 R7(1차 지진에 의한 손상=IO-Level)에서 DCF_1 이 비보강 골조에 비해 14.4% 감소하였고 DCF_1 의 값이 1.18로 1.0에 근접한 것을 볼 수 있다. 이는 FRP 재킷 보수가 손상 분배에 효과적임을 보여주고 있으나, 1차 지진에 의한 영향에 따라 손상 분배 관련 FRP 보수 효과가 크게 달라질 수 있음을 나타낸다. Repair-N1-S3와 Repair-N2-S3의 각 층에 대한 DCF를 비교하였을 때 모든 층에서 평균값의 차이는 0.1%미만으로 차이가 미미한 것을 볼 수 있다. 이는 FRP 재킷의 layer 추가(FRP 두께 증가)는 구속

효과를 상승시키는 효과가 있으나, 4.2절에 언급한 것과 같이 FRP 재킷에 의한 충분한 구속력을 확보한 경우 손상분배의 효과가 두드러지게 나타나지 않은 것을 의미한다. 따라서 FRP 재킷 설계 시 목표 구속력을 설정하고 이를 바탕으로 layer 수를 결정하는 것이 타당하다.

〈Fig. 8〉는 FRP 재킷의 설치 위치(Repair-N1-S1, Repair-N1-S2 그리고 Repair-N1-S3)에 대한 비보강 골조와 FRP-보수된 골조의 각 층에 대한 DCF값을 나타낸 것이다. 전반적으로 FRP 설치위치가 증가할수록 DCF가 집중되는 1층의 DCF 값이 1.0에 근접하는 것을 볼 수 있다. 3개 층에 FRP 재킷을 모두 보수한 경우 10개의 연속 지진에 대하여 비보강 모델 대비 평균 DCF_1 의 값은 0.1% 정도의 미세한 차이를 보였다. 이는 그림에 제시된 것과 같이 특정 지진하중에서 DCF_1 의 값이 비보강 모델 대비 크게 증가했기 때문이다(그림의 회색 선 참고).

5. 결론

본 논문에서는 본진에 의하여 손상된 지진 취약 RC 골조 건축물에 대하여 FRP 재킷 설치에 따른 연속지진에 대한 보수 효과를 조사하였다. 이를 위하여 과거 연구에서 검증된 시간종속요소를 활용한 FRP 재킷 보수 모델링 방법을 활용하여 3층 지진 취약 RC 골조에 적용하였으며, 연속지진에 대한 비선형 시간이력해석을 통해 FRP 재킷 시스템의 주요 변수에 따른 보수 효과를 평가하였다. 이에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) 전반적으로 1차 지진으로 인해 손상된 비연성 RC 골조에 대하여 FRP 재킷 보수는 연속 지진에 대하여 변위가 감소한 것으로 나타났다.
- 2) FRP 설치 위치에 대한 변위저감 효과에 따른 결과를 살펴보면, FRP 설치 위치 최소화를 위하여 (경제성 고려) 1차 지진에 의하여 변위가 집중되는 1층에 FRP 재킷을 설치하는 것이 효율적인 것을 볼 수 있다.
- 3) FRP 재킷의 두께 증가는 기존 기둥에 작용하는 구속력의 증가에 의해 연성능력을 향상할 수 있다.

므로, 기둥의 전단파괴를 지연시키는 것에 효과적이다. 그러나 본 연구에서는 FRP 두께의 증가는 변위저감 효과가 미미한 것으로 나타났다. 이는 1개의 layer로 구성된 FRP 재킷의 설치만으로 충분한 연성능력을 확보하였기 때문인 것으로 사료된다.

- 4) 본진에 의하여 손상된 RC 골조에 대한 연층현상의 저감 효과는 변위가 집중되는 1층에서 두드러지게 나타나지 않았지만, 2층과 3층에 대한 DCF 값이 비보강 RC 골조 모델 대비 증가한 것을 볼 수 있다(3층 DCF 18% 향상).
- 4) 손상이 집중된 1층에 대한 FRP 재킷 보수에 의한 효과가 예상보다 낮은 이유는 1차 지진에 의한 누적손상에 기인한 것을 볼 수 있다. 1차 지진에 의한 손상수준이 상대적으로 낮은 경우(IO 또는 LS 수준)는 비교적 FRP 재킷에 의한 변위저감 효과 및 손상분포도를 보여주는 DCF값이 1.0에 상당히 근접한 것으로 나타났다. 이를 통하여 사전에 손상된 건축물에 대한 FRP 재킷의 설계 시 1차 지진에 의한 손상수준을 고려한 보수전략을 구축해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원(2022-MOIS63-003) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2021R1F1A1059976)을 받아 수행된 연구임.

References

1. Bracci, J. M., Reinhorn, A. M., & Mander, J. B., "Seismic resistance of reinforced concrete frame structures designed for gravity loads: performance of structural system", *Structural Journal*, Vol. 92, No.5, pp.597~609, 1995, doi: 10.14359/909
2. Beres, A., Pessiki, S. P., White, R. N., &

- Gergely, P., "Implications of experiments on the seismic behavior of gravity load designed RC beam-to-column connections", *Earthquake Spectra*, Vol.12, No.2, pp.185~198, 1996, doi: 10.1193/1.1585876
3. El-Attar, A. G., White, R. N., & Gergely, P., "Behavior of gravity load design reinforced concrete buildings subjected to earthquakes", *Structural Journal*, Vol.94, No.2, pp.133~145, 1997, doi: 10.14359/468
 4. Kam, W. Y., Pampanin, S., & Elwood, K., "Seismic performance of reinforced concrete buildings in the 22 February Christchurch (Lyttleton) earthquake", 2011.
 5. Morita K, Takayama M. Comparison of LOPES measurements with CoREAS and REAS 3.1 simulations. In: Proceedings of the international conference of global network for innovative technology and AWAM international conference in civil engineering (IGNITE-AICCE'17), AIP Conference Proceedings 2017, Penang, Malaysia; 1892: 020007-1 - 8.
 6. Aschheim, M., & Black, E., "Effects of prior earthquake damage on response of simple stiffness-degrading structures", *Earthquake Spectra*, Vol.15, No.1, pp.1~24, 1999, doi: 10.1193/1.1586026
 7. LeBorgne, M. R., "Modeling the post shear failure behavior of reinforced concrete columns", Doctoral dissertation, 2012.
 8. Fakharifar, M., Chen, G., Sneed, L., & Dalvand, A., "Seismic performance of post-mainshock FRP/steel repaired RC bridge columns subjected to aftershocks", *Composites Part B: Engineering*, Vol.72, pp.183~198, doi:10.1016/j.compositesb.2014.12.010
 9. Jeon, J. S., DesRoches, R., Lowes, L. N., & Brilakis, I., "Framework of aftershock fragility assessment-case studies: older California reinforced concrete building frames", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.44, No.15, pp.2617~2636, 2015, doi: 10.1002/eqe.2599
 10. Seible, F., Priestley, M. J. N., & Innamorato, D., "Earthquake retrofit of bridge columns with continuous carbon fiber jackets, volume II, design guidelines", *Advanced Composites Technology Transfer Consortium*, 1995.
 11. Seible, F., Priestley, M. N., Hegemier, G. A., & Innamorato, D., "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *Journal of composites for construction*, Vol.1, No.2, pp.52~62, 1997.
 12. Xiao, Y., Wu, H., & Martin, G. R., "Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength", *Journal of structural engineering*, Vol.125, No.3, pp.255~264, 1999.
 13. Patel, S., "Rehabilitation of Non-Ductile Reinforced Concrete Building Columns Against Brittle Shear Failure Using Fiber-Reinforced Polymer Jackets", Bethlehem (PA): Lehigh University, 2000.
 14. Sause, R., Harries, K. A., Walkup, S. L., Pessiki, S., & Ricles, J. M., "Flexural behavior of concrete columns retrofitted with carbon fiber-reinforced polymer jackets", *Structural Journal*, Vol.101, No.5, pp.708~716, 2004, doi: 10.14359/13393
 15. You, Y. C., Choi, K. S., & Kim, J., "An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system", *Composites Part B: Engineering*, Vol.43, No.8, pp.3026~3036, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.05.030
 16. Shin, J., Jeon, J. S., Kim, J., "Numerical Column Model for Damaged Non-ductile Reinforced Concrete Frame Repaired Using

- FRP Jacketing System". Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.22, No.5, pp.291-298, 2018.
17. Karayannis, C. G., & Sirkelis, G. M., "Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.37, No.5, pp.769~790, 2008, doi: 10.1002/eqe.785
 18. Priestly, M. J. N., F. Seible, and E. R. Fyfe. "Repair of shear column using fiberglass/epoxy jacket and epoxy injection." Rep. No.93-04, Job No.90 8, 1993.
 19. Vecchio, F. J., & Collins, M. P., "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", ACI J., Vol.83, No.2, pp.219~231, 1986.
 20. Kurama, Y., "Seismic behavior, performance, and retrofit of non-ductile reinforced concrete frame structures", Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 1996.
 21. ACI Committee 318, Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318- 63). Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 1963.
 23. Ozcan, O., Binici, B., & Ozcebe, G., "Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers", Engineering structures, Vol.30, No.6, pp.1632~1646, 2008, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.10.013
 24. Shin, J., Scott, D. W., Stewart, L. K., Yang, C. S., Wright, T. R., & DesRoches, R., "Dynamic response of a full-scale reinforced concrete building frame retrofitted with FRP column jackets", Engineering Structures, 125, 244-253, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.07.016
 25. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., & Jin, L., "Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps", ACI structural Journal, Vol.94, No.206-215, 1997.
 26. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. PEER Ground Motion Database. Berkeley: University of California. <<http://peer.berkeley.edu/smcat> >.
 27. Shin, J., Kim, J., & Lee, K., "Seismic assessment of damaged piloti-type RC building subjected to successive earthquakes" Earthquake engineering & Structural dynamics, Vol.43, No.11, pp. 1603~1619, 2014, doi: 10.1002/eqe.2412
 28. Lee CS, Hegemier GA, Phillippi DJ. Analytical model for fiber-reinforced polymerjacketed square concrete columns in axial compression. ACI Struct J 2010;107(02):208-17.
 29. Elnashai AS, Papanikolaou V, Lee DH. ZeusNL-A program for inelastic dynamic analysis of structures. IL: MAE Center, University of Illinois at Urbana-Champaign; 2001.
- Received : October 17, 2022
 - Revised : December 6, 2022
 - Accepted : December 15, 2022