

유한요소해석을 활용한 지진하중에 대한 철근콘크리트 건축물의 부착성능 효과 연구

Bond-slip Effect of Reinforced Concrete Building Structure under Seismic Load using Finite Element Analysis

김 예 은*
Kim, Yeeun

김 혜 원**
Kim, Hyewon

신 지 옥***
Shin, Jiuk

Abstract

Existing reinforced concrete building structures constructed before 1988 have seismically-deficient reinforcing details, which can lead to the premature failure of the columns and beam-column joints. The premature failure was resulted from the inadequate bonding performance between the reinforcing bars and surrounding concrete on the main structural elements. This paper aims to quantify the bond-slip effect on the dynamic responses of reinforced concrete frame models using finite element analyses. The bond-slip behavior was modeled using an one-dimensional slide line model in LS-DYNA. The bond-slip models were varied with the bonding conditions and failure modes, and implemented to the well-validated finite element models. The dynamic responses of the frame models with the several bonding conditions were compared to the validated models reproducing the actual behavior. It verifies that the bond-slip effects significantly affected the dynamic responses of the reinforced concrete building structures.

Keywords : Existing Reinforced Concrete, Finite element Analysis, Bond-slip Effect, One-dimensional slide line model

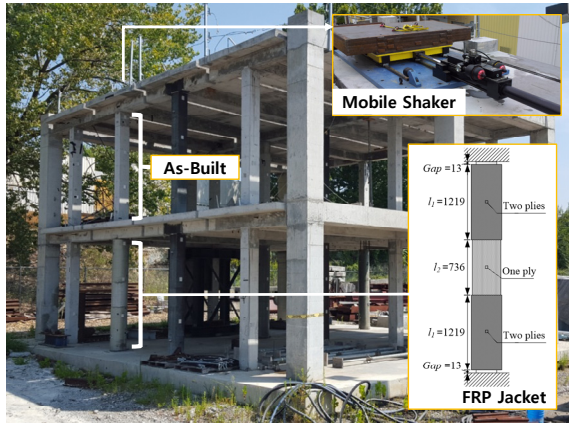
1. 서론

1988년 이전 건설된 철근콘크리트 건축물은 지진에 취약한 특성을 갖는다. 특히, 주요 구조 부재 중 기둥은 작은 직경을 가진 띠철근의 넓은 간격 배치에 의해 전단 파괴가 발생할 수 있으며, 최대 모멘트가 발생하는 영역에 배치된 겹침 이음은 철근과 콘크리트 사이에 부착과 파괴가 발생할 수 있다. 이와 같이 지진에 취약한 철근 상세에 의한 파괴 유형은 특정 층에 손상이 집중되는 연층

현상(Soft-story Mechanism)을 발생시킬 수 있으며, 이는 건축물 조기 파단(Premature Failure)의 주요 원인이 될 수 있다. 이처럼 주요 구조 부재의 철근과 콘크리트 사이의 부착성능은 건축물의 내진성능에 상당한 영향을 줄 수 있다. Choi et al.(2012)은 지진과 같은 반복 하중에 의해 철근콘크리트 부재에 나타나는 부착성능을 반영한 해석 기반의 부착연성평가법을 제시하며 지진하중에 의한 부착과 파괴 분석의 필요성을 강조했다.

건축물의 내진성능에 영향을 미칠 수 있는 부착과 파괴 현상을 최소화하기 위한 목적으로 과거에 많은 연구가 수행되었다. FRP(Fiber-Reinforced Polymer) 재킷은 기둥 부재의 외부에서 보강하는 방식으로 콘크리트에 추가 압력을 부여하여 연성능력을 향상시킬 수 있으며, 이와 동시에 부착성능을 향상시킬 수 있다. Seible et al.(1997), Xiao et al.(1999) 그리고 Sause et al.(2004) 등의 과거 수행된 FRP 재킷 기둥 보강 실험 연구는 FRP 재킷이 지진에 취약한 상세설계를 갖는 기둥에 보강하였을 때 연성능력 향상 외에 휨, 전단파괴 등을 지연시킬 수 있음을 검증하였다. Shin et al.(2021)은 FRP

* 학생회원, 경상국립대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
Department of Architectural Engineering,
Gyeongsang National University
E-mail: kbc869890@naver.com
** 정회원, 국립재난안전연구원, 지진방재센터, 공학박사
Earthquake Hazards Reduction Center, National
Disaster Management Research Institute
E-mail: kimhw0114@korea.kr
*** 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(교신저자)



〈Fig. 1〉 Full scale RC test frame detail (Shin et al.(2021))

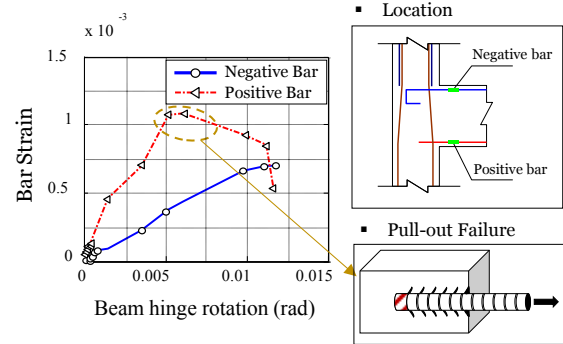
재킷 시스템의 효과를 실규모 동적 실험을 통해 변위저감 및 연층현상저감 효과를 검증하였으며, 이와 더불어 FRP 재킷 보강이 부착능 향상에 효과적임을 보여주었다. 또한 실험 결과 동적 응답 값을 바탕으로 개발한 유한요소해석모델을 탄성 및 비탄성 영역에서 거동한 하중 시나리오에 대한 실험을 수행하여 동적 실험과 비교하며 해석모델의 적합성을 검증하였다. 〈Fig. 1〉은 실규모 골조 실험체 내 FRP 재킷 기동과 Mobile Shaker의 위치를 보여준다. 이와 관련해 자세한 해석모델의 개발 및 검증 과정은 Shin et al.(2021)을 참고할 수 있다.

본 연구의 목적은 유한요소해석기법을 활용하여 FRP 재킷이 보강된 철근 콘크리트 골조 건축물에 대한 부착모델의 효과를 정량화하는 것이다. 이를 위하여 부착변수를 다르게 적용한 유한요소해석모델을 형성하고, 이에 따른 동적 하중에 대한 건축물의 거동을 비교 및 분석하였다. 해당 연구를 통해 형성된 모델의 부착성능 고려 정도에 따라 동적 하중 발생 시 나타나는 거동 차이를 비교하여 부착모델 변수 설정의 필요성을 보여주고자 한다.

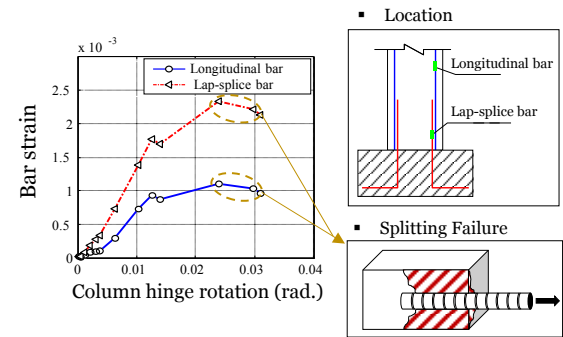
2. 부착파괴 분석 및 변수 설정

2.1 부착파괴 분석

부착파괴는 철근과 콘크리트의 부착응력이 허용 부착응력을 넘는 경우 부재가 파괴되는 현상으로 철근이 뽑혀 나오는 뽑힘파괴와 콘크리트에 균열이 발생하는 쪼갬파괴가 나타난다. 부착파괴 발생 여부는 항복 전 철근



〈Fig. 2〉 Column rotation-bar strain relationship (Shin et al.(2021))



〈Fig. 3〉 Beam rotation-bar strain relationship (Shin et al.(2021))

부재의 변형률 증감에 따라 판정할 수 있다. 부재의 회전각과 변형률 관계를 통한 하중 시나리오가 증가하면 실험체 내 기동 또는 보의 회전각은 지속적으로 증가한다. 이러한 경우 철근의 변형률은 항복 전까지 지속적으로 증가한다. 〈Fig. 2〉와 〈Fig. 3〉은 Shin et al.(2021)의 실규모 동적 실험에서 부착파괴가 관찰된 비보강 상태의 1층 기동 겹침 이음부와 보-기동 접합부 영역에서 나타난 기동과 보의 회전각과 철근 변형률 관계 및 파괴양상을 각각 나타낸 것이다. 〈Fig. 2〉에 제시된 기동 겹침 이음부에 대한 관계를 보면 기동의 회전각이 증가함에 철근의 변형률이 지속적으로 증가하다 감소하는 것으로 나타난다. 이는 기동 내 철근 변형률이 항복 변형률에 도달하기 전에 쪼갬파괴(Splitting Failure)가 발생한 것이다. 〈Fig. 3〉에 제시된 보-기동 접합부에 대한 관계에서 정모멘트 방향의 보 정착 철근의 변형률이 감소하는 것으로 나타났으며, 뽑힘파괴(Pull-out Failure)가 발생한 것을 볼 수 있다. 본 실험에서는 비교 모델 별 적용할 다양한 부착상태를 설정하기 위해 해당 실험

결과에 따라 부착과괴가 발생한 기둥과 보 부재의 부착 상태는 Poor Bonding Condition으로 설정하였으며, 그 외 부착과괴가 나타나지 않은 부재의 부착상태는 Good Bonding Condition으로 설정하였다.

2.2 유한요소해석기반 부착과괴 모델링 방식

유한요소해석모델의 부착효과를 실제와 유사하게 구현하기 위해서는 콘크리트와 철근 사이의 결합상태를 잘 나타낼 수 있어야 한다. 본 연구에서 활용한 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA는 콘크리트와 철근 사이의 결합상태 설정을 3가지 방법론으로 모델링할 수 있다.

2.2.1 기존 모델링 방식

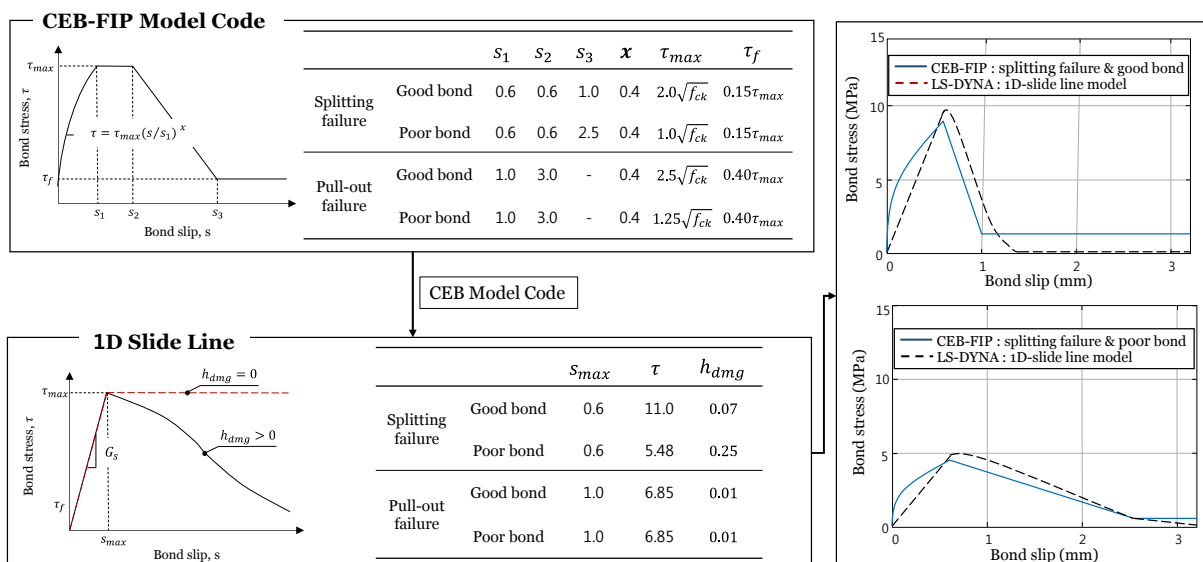
철근콘크리트 부재 및 구조물에 대한 유한요소해석모델 개발 시 철근과 콘크리트 요소를 연결하기 위해 일반적으로 활용하는 방식은 Merging Node방식이다. 해당 방식은 모델 형성 시 다른 부재들 간 겹쳐지는 Node를 일체화함으로써 두 부재가 하나의 Node를 공유하도록 하는 것이다. Lu et al.(2015)은 Merging Node 방식을 이용하여 콘크리트와 FRP를 모델링하여 파괴 현상을 관찰하는 실험을 통해 이 방식이 Node 수를 줄일 수 있으므로, 해석 속도 측면에서는 매우 유리하다는 점을 보

여주었다. 하지만 일체화된 Node로 인해 부착과괴 현상을 관찰할 수 없어 해당 방식은 다른 재료로 구성된 요소 사이의 부착효과를 구현하기 위하여 합리적인 방식은 아니라는 것을 보여주었다.

LS-DYNA에서 부착과괴 현상을 구현할 수 있는 또 다른 방식은 Contact 옵션을 통해 마찰계수를 입력하는 것이다. 이는 Merging Node 방식과 달리 철근과 콘크리트 사이의 부착강성을 반영하여 마찰계수 입력으로 부착성능을 구현할 수 있다. 하지만 해당 방식은 마찰계수에 따라 부착효과를 선형거동으로 묘사하기 때문에 이선형 거동을 하는 실제 부착과괴 현상과 다르게 최대 부착응력 도달 후에도 응력이 감소하지 않는다. Contact 옵션을 통한 부착과괴 모델링 방식은 탄성범위 이내에 서만 효과적이므로 실제 부착과괴를 구현하는 것은 한계가 있다.

2.2.2 1D-Slide Line 방식

LS-DYNA에서 제시하는 1D-Slide Line 방식을 사용하면 철근과 콘크리트의 노드 사이에 전단력을 전달할 수 있다. 이 모델은 식(1)에 제시한 바와 같이 결합 전단계수(G_s), 최대 탄성 변형(s_{max}), 손상계수(h_{dmg}) 등으로 부착거동을 묘사할 수 있으므로, 최대 부착응력 발생 이후의 거동을 고려할 수 있다.



(Fig. 4) Implementation of bond-slip model to FE frame models

〈Table 1〉 Concrete Material Parameter(MPa)

	Concrete strength (ω -value)			
	First story		Second story	
	Column	Beam	Column	Beam
As-built	31.5 (0.5)	25.0 (0.5)	28.5 (0.5)	23.5 (0.5)
Retrofitted	32.8 (0.9)	26.5 (0.5)	30.5 (0.5)	23.5 (0.5)

〈Table 2〉 Steel Material Parameter (MPa)

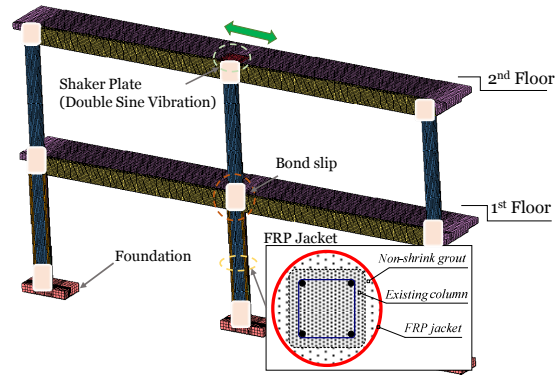
	Stirrup (D10)	Beam (D19)	Column (D25)
Elastic Modulus	196,500	193,800	208,500
Yield Strength	506.4	431.7	512.5
Ultimate Strength	738.6	734.4	663.3

$$\tau = \begin{cases} G_s s, & \leq s_{max} \\ \tau_{max} e^{-h_{dm,g} D}, & > s_{max} \end{cases} \quad (1)$$

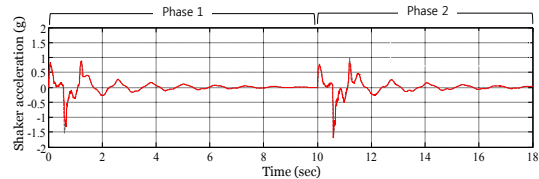
여기서, $h_{dm,g}$ 는 소성 변위(Δs_p)의 증가에 따라 응력을 감소시키며 D는 $\Delta s_p (D_{n+1} = D_n + \Delta s_p, n$ 은 각 단계를 나타내는 변수)의 절댓값의 합을 의미한다. 식(1)에 제시된 것과 같이 1D-Slide Line 방식을 통한 부차파괴 형상은 이선형 거동이라 가정하고 있으며, τ_{max} 에 도달한 이후에 부차응력의 감소가 발생한다. (〈Fig. 4〉의 1D-Slide Line Model 참고) 이 방식을 이용한 모델은 기본적으로 $h_{dm,g}$ 값에 따라 소성범위까지도 부차응력이 감소하는 거동을 묘사할 수 있으므로 본 연구에서는 1D-Slide Line 방식을 통해 부차성능 효과를 구현하였다.

2.3 부차파괴 파라미터 설정

본 연구에서는 CEB-FIP Model Code(2010)에 제시된 부차상태 별 세부 파라미터를 반영하여 이를 토대로 1D-Slide Line에 활용되는 파라미터($h_{dm,g}, s_{max}, \tau_{max}$ 등)의 값을 산정하였다. CEB-FIP Model Code는 유럽의 콘크리트 위원회에서 콘크리트 성능의 기준 및 파라미터값을 제시한 모델로 부차성능을 구현하기 위해 고려하는 변수와 부차파괴에 따른 부차응력의 거동 형상



〈Fig. 5〉 Finite Element Model details



〈Fig. 6〉 Time-shaker acceleration histories

이 1D-Slide Line 방식과 유사하다. (〈Fig. 4〉)는 두 모델의 부차상태와 파괴유형별 부차모델의 세부 파라미터와 1D-Slide Line이 실제 부차파괴 거동을 묘사할 수 있는지를 검증하기 위하여 각각의 부차상태와 파괴 유형 별로 CEB-FIP Model Code에서 제시하는 변형-전단응력의 관계를 유한요소해석에 계산된 부차 거동과 비교하였다.

3. 부차성능 적용 모델 형성

3.1 유한요소해석모델 형성

〈Table 1〉과 〈Table 2〉에 유한요소해석모델 개발을 위해 사용된 콘크리트와 철근의 파라미터를 각각 나타내었다. 콘크리트 재료는 FRP 재킷 보강시스템에 의한 추가적인 구속 효과(Confinement Effect)를 정밀하게 묘사하기 위해 K&C(Karagozian & Case) 콘크리트 모델을 사용하였다. 해당 모델은 비구속 콘크리트 압축 강도 설정만으로 최대 강도 도달 이후 구속 효과를 낼 수 있으며 이외에도 전단 팽창(Strain Softening), 변형연화(Shear Dilation) 등을 구현할 수 있다. 철근 재료는 항복 후 강성비 설정과 함께 이선형 거동을 구성할 수

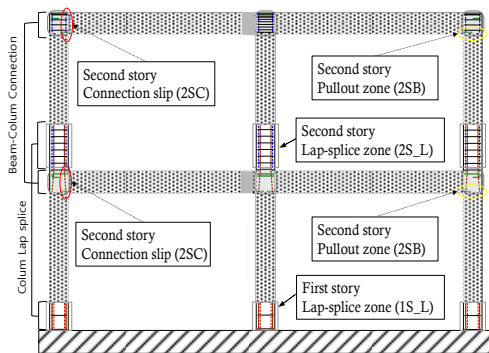
<Table 3> Information on Bonding Conditions Implemented to FE Models

Condition	As-built						Retrofitted					
	Column lap splice		Beam-Column Connection				Column lap splice		Beam-Column Connection			
Index	1S_L	2S_L	1SB	1SC	2SB	1SC	1S_L	2S_L	1SB	1SC	2SB	1SC
Model-1 (Actual)	P	G	P	P	P	G	G	G	P	P	P	G
Model-2 (All-Good)	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
Model-3 (Node Merging)	All Bonding (1D-Slide line deactivation)											

* G : Good bonding condition
P : Poor bonding condition

있는 탄소성 모델을 사용하였다. 해당 철근은 0.15의 변형률에서 극한강도가 발휘되도록 설정하였으며, 변형률이 0.25에 도달하였을 때 파단이 발생하는 것으로 가정하였다.

용한 더블사인파의 시간-가속도 관계를 나타낸 것으로, Phase-1과 Phase-2로 나누어 그림에 표기하였다. 이와 관련 실험시 활용한 하중에 대한 자세한 정보는 Shin et al.(2021)을 참고할 수 있다.



<Fig. 7> Bonding Condition location

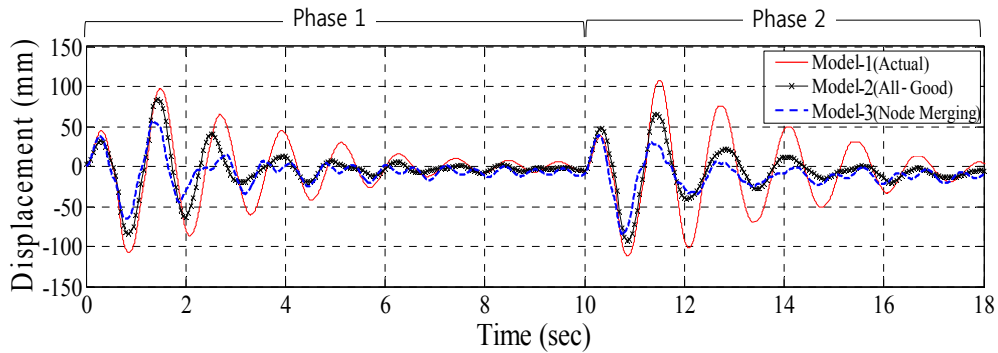
FRP 재킷 시스템은 무수축 그라우트(Non-shrink Grout)와 FRP 재킷으로 구성되었다. 무수축 그라우트는 K&C모델로 거동을 구현하였고, FRP 재킷은 Orthotropic 재료 모델을 활용하여 탄성계수(E), 포아슨 비(ν), 전단계수(G) 설정으로 거동을 묘사하였다. FRP 재킷과 무수축 그라우트 사이의 접촉면은 Contact Automatic Surface-To-Surface 옵션을 활용하여 마찰 계수를 입력하는 방식을 적용하였다. <Fig. 5>에 개발된 유한요소해석 모델의 상세를 나타내었다.

모델에 적용한 하중은 더블사인파(Double Sine Pulse)로 실물 동적 실험시 비탄성 범위의 거동을 유도하기 위한 것이다. <Fig. 6>은 비보강 상태의 모델에 적

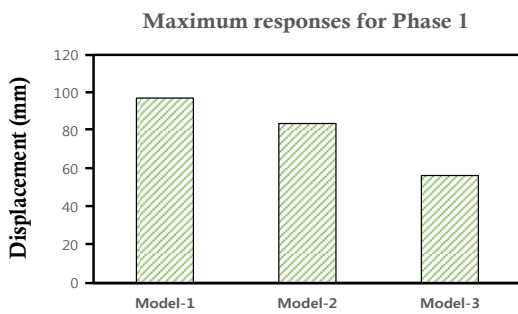
3.2 부착파괴 파라미터 적용

<Fig. 7>은 앞서 3.1절에서 개발한 유한요소해석모델의 동적 응답 비교를 위해 부착성능을 적용할 위치를 나타낸 것이다. 실규모 동적 실험에서 균열이 관찰된 기둥-보 접합부 이음부와 보-기둥 접합부로 위치를 선정하였으며 비보강 상태와 보강상태로 한 번 더 부착성능을 다르게 적용하였다. 또한 층별 보-기둥 접합부는 정모멘트 방향 보-철근(1SB, 2SB)과 기둥-철근(1SC, 2SC)으로 분류하여 동적 응답을 자세히 묘사하였다. <Table 3>은 부착상태에 따라 본 연구에서 고려한 3가지 모델의 세부 위치별 부착상태를 보여준다.

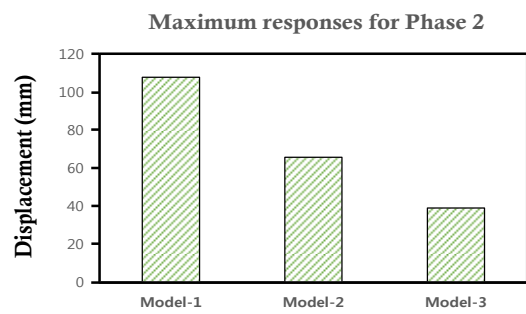
Model-1의 경우 실규모 동적 실험의 결과를 바탕으로 측정된 부착성능을 반영한 모델으로 균열이 발생한 비보강 실험체(As-built)의 1층 기둥-보 접합부와 1층, 2층 보-기둥 접합부와 보강 실험체(Retrofitted)의 보-기둥 접합부의 부착상태를 Poor Condition으로 가정하였다. Model-2는 모든 부재의 부착상태를 Good Condition으로 설정하여 부착성능을 전반적으로 높게 적용하여 Model-1에 비해 더 높은 강성으로 모델링하였다. Model-3은 부착효과를 반영하지 않기 위해 전체 부재에 Merging Node방식을 이용하여 모델링하였다.



(a) Time-displacement histories for as-built models



(b) Maximum responses for Phase 1



(c) Maximum responses for Phase 2

〈Fig. 8〉 Dynamic response of as-built models with different types of building conditions

4. 부착성능에 따른 거동 차이 분석

본 연구에서는 유한요소해석기법을 활용하여 FRP 재킷이 보강된 철근콘크리트 골조 건축물에 대한 부착모델의 영향을 확인하기 위해 3절에서 개발한 부착성능이 다른 모델의 시간-변위 응답 결과를 비교 및 분석하였다.

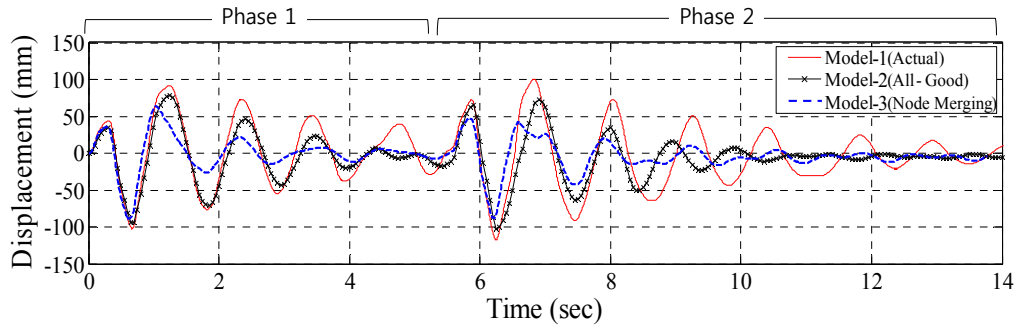
〈Fig. 8〉과 〈Fig. 9〉는 본 연구에서 고려된 부착성능이 다른 비보강 및 보강 해석모델의 시간-변위 응답과 하중 구간 별 최대변위응답을 각각 나타낸 것이다. 하중 구간은 시간-변위 응답 그래프에서 나타난 사인파에서 변위가 급속도로 증가하는 부분을 기준으로 하여 첫 번째 구간(Phase 1)과 두 번째 구간(Phase 2)으로 구분하였다.

〈Fig. 8〉에서 나타난 비보강 모델의 경우 두 구간 모두 시간-변위 응답 그래프에서 부착강성이 높은 모델(Model-3 > Model-2 > Model-1)일수록 변위가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 강성이 높아지면 하중에 대한 부착력이 증가하여 최대변위응답이 감소한 것

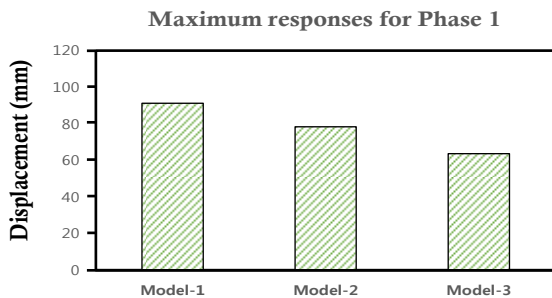
이다. 특히, Phase 2에서는 이전 구간에 작용한 하중으로 인해 파괴가 누적되어 변위가 크게 나타난 Model-1이 변위가 비교적 적게 나타난 다른 모델에 비하여 최대 변위응답이 최소 30mm 더 높게 나타난 것을 알 수 있다.

〈Fig. 9〉의 보강 모델의 경우 비보강 모델과 마찬가지로 부착강성이 증가할수록 시간-변위 응답 그래프의 변위가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 구간별 최대변위응답의 차이를 보았을 때, 1D-Slide Line 모델을 통해 부착성능을 구현한 Model-1은 Phase 1에 비해 Phase 2의 최대변위가 약 9.6mm 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 Phase 1에 가해진 하중에 의해 상당한 손상이 누적되었기 때문에 Phase 2에 작용된 하중에서 더 큰 변위가 발생한 것이다. 이는 1D-Slide Line 모델의 적용은 누적 손상을 적합하게 반영하고 있음을 보여준다.

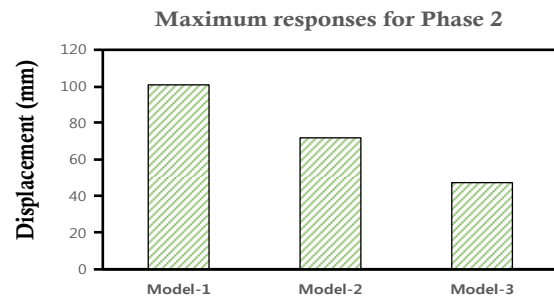
〈Fig. 10〉은 Model-3(Merging Node 활용)과 Model-1(실제 응답 유사모델)의 최대변위응답 차이를 보여준다. 비보강 해석모델의 경우 Model-1 대비



(a) Time-displacement histories for retrofitted models

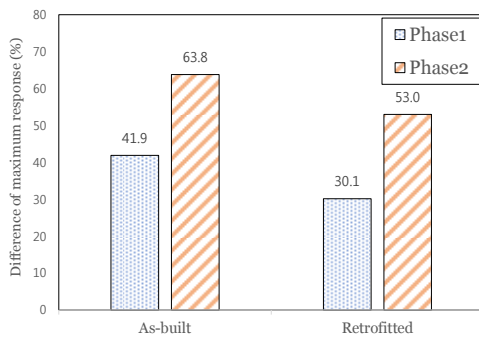


(b) Maximum responses for Phase 1

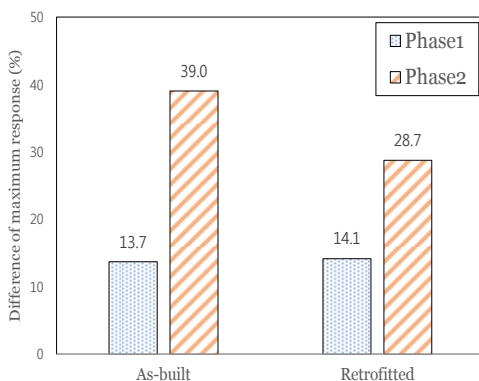


(c) Maximum responses for Phase 2

〈Fig. 9〉 Dynamic response of retrofitted models with different types of building conditions



〈Fig. 10〉 Difference of maximum responses of Model-1 & Model-3



〈Fig. 11〉 Difference of maximum responses of Model-1 & Model-2

Model-3의 최대변위는 Phase 1에서 41.9%, Phase 2에서 63.8%의 오차를 보였으며, 보강 실험체의 최대변위 응답은 Phase-1에서 30.1%, Phase2에서 53.0% 과소 예측한 것으로 나타났다. 이는 Model-3은 Merging Node 방식을 사용하여 부착성능을 실제보다 크게 모델링 하였으므로, 최대변위응답을 과소평가함을 보여준다. 이를 통해 유한요소해석을 활용하여 구조물의 파괴 현상 등의 동적 응답을 예측하기 위한 목적으로 사용하는 모델은 Merging Node 방식 적용이 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

〈Fig. 11〉에 제시된 Model-1(실제 응답 유사모델)과 Model-2(All Good Condition 모델)의 최대변위응답 차이는 구조물 위치별 부착성능 구분이 해석모델의 동적 응답에 미치는 영향을 볼 수 있다. 보강 모델에서 Model-1과 같이 보-기둥 접합부 사이의 부착성능이 Poor Condition을 가질 때 최대변위응답은 모든 부착성능을 Good Condition으로 모델링한 Model-3 대비 평균 26.4% 차이로 증가했음을 보여준다. 또한 비보강 모델에서 기둥 겹침 이음부와 보-기둥 접합부 사이의 부착성능이 Poor Condition을 가질 때 최대변위응답은 Model-3 대비 평균 21.4% 증가한 것을 보여준다. 이는

부착성능을 실제와 유사하게 구현한 해석모델이 부착성능을 높은 모델과 상당한 차이를 보이는 것을 통해 부착성능 구현이 동적 응답에 관찰에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 부착성능을 다양하게 적용한 모델들의 동적 응답을 비교 및 분석하여 해석모델 개발 시 고려해야 할 부착성능 관련 사항들을 정리하고자 하였다. 이를 통하여 도출된 결과는 다음과 같다.

1) 비보강 및 보강 모델의 시간-변위 응답 그래프에서 모델 내 부착성능이 높을수록 변위가 감소하는 것을 보여준다. 이는 부착성능이 좋은 모델일수록 강성이 커지기 때문에 부착파괴 현상을 최소화할 수 있다.

2) 1D-Slide Line 방식을 사용한 비보강 및 보강해석 모델의 시간-변위 응답 그래프가 Phase-1에 비해 Phase-2에서 약 10mm 더 크게 나타났다. 이는 하중에 의한 손상이 누적된다는 것을 의미한다. 이를 통해 1D-Slide Line 방식을 이용한 해석모델이 누적손상을 잘 반영하므로, 동적 응답 묘사에 적합하다는 것을 보여준다.

3) 일반적으로 부재 연결 시 가장 많이 사용하는 Merging Node 방식을 이용한 모델(Model-3)은 실제 부착성능을 구현한 모델(Model-1)보다 최대변위응답이 최대 64% 과소평가된 것으로 보아 동적 응답을 묘사하기 위한 방식으로 Merging Node 방식을 사용하는 것은 적합하지 않은 것으로 나타났다.

4) 철근과 콘크리트 사이의 부착성능에 따른 해석모델의 결과 차이를 살펴보면, Poor Condition을 갖는 모델의 최대변위응답은 Good Condition으로만 형성된 모델 대비 20%이상 과대평가되는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 철근상세에 따른 부착성능 모델링 방식론 선정, 부착성능 결정은 지진하중에 대한 철근콘크리트 건축물의 보다 정확한 성능 예측에 상당한 영향을 미칠 것으로 사

료된다.

5) 상기에 언급한 것과 같이 부착성능은 구조물의 동적 거동에 상당한 영향을 미치므로, 철근콘크리트 건축물에 대한 정확한 동적 응답 예측을 위한 유한요소해석모델의 개발 시 구조 상세에 따른 부착거동을 예상하고, 이를 기반으로 철근과 콘크리트 사이의 적합한 부착성능을 모델링 해야 한다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원(2022-MOIS63-003) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2021R1F1A1A1059976)을 받아 수행된 연구임.

References

1. Choi, H. B., & Lee, J. Y., "Evaluation for Deformability of RC Members Failing in Bond after Flexural Yielding" Korea Concrete Institute, Vol. 24, No. 3, pp.259-266, 2012, doi: 10.4334/JKCI.2012.24.3.259
2. 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, doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(52)
3. 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.
4. Noguchi, M., & Uematsu, Y., "Design Wind Pressure Coefficients for Spherical Domes", Proceedings of the Annual Meeting 2003, Japan Association for wind Engineering, Japan, No.95, pp.177~178, 2003, doi: 10.14887/jaweam.2003.0.88.0

5. Shin, J., Lee, S. Y., & Ji, D. H., "Finite Element Analyses of Seismically Vulnerable Reinforced Concrete Building Frame Retrofitted Using FRP Column Jacketing System", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.21, No.2, 57-66, 2021, doi: 10.9712/KASS.2021.21.2.57
6. Crawford, J.E., Wu, Y., Choi, H., Magallanes, J.M. & Lan, S. "Use and validation of the release III K&C concrete material model in LSDYNA," TR-11-36.6 Technical report, Karagozian & Case, Glendale, California, 2012.
7. Shi, Y., Li, Z. X., & Hao, H., "Bond slip modelling and its effect on numerical analysis of blast-induced responses of RC columns", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.32, No.2, pp.251-267, 2009, doi: 10.12989/sem.2009.32.2.251
8. CEB-FIP MODEL CODE, "Model code for concrete structures", In: Comité Euro-International du Béton. Secretariat permanent. Case Postale 88, CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2010.
9. Lu, X. Z., Jiang, J. J., Teng, J. G., & Ye, L. P., "Finite element simulation of debonding in FRP-to-concrete bonded joints", *Construction and building materials*, Vol.20, No.6, pp. 412-424, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.033

- Received : September 13, 2022
- Revised : November 14, 2022
- Accepted : November 29, 2022