

대각 가새형 마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조의 동적실험 및 비선형 해석

이수웅¹ · 신경재² · 이희두³ · 신혜민^{4*}

¹석사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, ²교수, 경북대학교, 건설환경에너지공학부,
³전임연구원, 경북대학교, 건설안전기술연구소, ⁴박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부

Dynamic Test and Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frame Retrofitted by Diagonal Brace Type Friction Damper

Lee, Su-Woong¹, Shin, Kyung-Jae², Lee, Hee-Du³, Shin, Hye-Min^{4*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

³Research Fellow, Institute of Building Safety Technology, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

⁴Graduate Student (Ph.D. Course), Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

Abstract - As the frequency of earthquakes in Korea increases, interest in evaluating the seismic performance of existing buildings and developing reinforcement methods is increasing. The friction damper transmits the stress by the frictional force generated by the strong tightening force of the high tension bolt, so the rigidity of the joint is high and installation is easy. Therefore, in this study, a shaking table experiment was performed for artificial seismic waves having short-period response characteristics similar to those of domestic seismic wave characteristics, using the initial introduced tension of the friction damper of reinforced concrete designed for non-seismic design. Based on the experimental results, a model of the hysteresis behavior of the friction damper was presented using OpenSees and a nonlinear analysis of the reinforced concrete frame reinforced with the friction damper was performed.

Keywords - Friction damper, Dynamic test, Nonlinear analysis, Seismic retrofit, Steel damper

1. 서론

2017년 경북 포항시에 발생한 규모 5.4의 지진은 인구밀집도가 높고 내진설계되지 않은 건축물이 밀집된 지역에서 발생하여 시설물 31,644개소가 피해를 입으며 국내 지진 중 최대 피해를 유발하였다(중앙재난안전대책본부, 2017). 피해 건축물 중 내진설계 되지 않은 건축물은 64.3 %로 5층 이하 소규모 건축물에 피해가 집중되었으며^[1] 기존 건축물의 내진성능 평가 및 보강방법 개발에 대한 관심이 높아졌다.

Note.-Discussion open until February 28, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 30, 2021; revised on June 10, 2021; approved on June 10, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-6590

E-mail. hyemin0705@knu.ac.kr

제진장치 중 구조부재에 대각 방향으로 가새형 댐퍼를 설치하는 경우 지진에 의한 반복하중이 발생하는 동안 댐퍼의 소성이력거동 및 감쇠를 통해 기존 건물의 지진변형응답을 저감하는 에너지소산장치로 지진발생 후 댐퍼부만 교체하여 사용 가능하다. 현재 국내·외적으로 기존 건축물의 내진 보강에 적용 가능한 에너지소산형 장치로 다양한 형태의 강재댐퍼 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[2]-[4]}. 그 중 댐퍼의 설계 및 작동 메커니즘이 단순명확한 마찰댐퍼는 고장력 볼트의 강력한 조임력에 의해 발생하는 마찰력으로 응력을 전달하는 마찰 접합방식을 통해 접합부의 강성이 높고 설치가 간편하다는 장점이 있다. Pall and Marsh^[5]는 마찰댐퍼를 X형 가새 교차부에 설치하는 시스템을 최초로 제안하였으며 Filiatrault and Cherry^[6]의 연구에서는 설계 슬립 하중 스펙트럼을 통해 Pall and Marsh의 마찰댐퍼를 다층골조에 실용적으로 적용할 수 있는 단순화된 제진설계법을 제안하였다. Sano *et al.*^[7]의 연구에서는 마찰댐퍼의 도입장력

의 저하를 방지하기 위해 여러 겹의 접시와서, 스테인리스 플레이트로 구성된 마찰댐퍼 상세를 제안하고 골조에 대각 가새 형태로 설치 후 반복 가력 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 마찰댐퍼의 볼트 구멍을 장슬롯으로 설계하여 최대변위를 늘리고 자체 제작한 고장력 대와서를 사용하여 마찰 면적을 넓힐 수 있도록 설계하였다. Shin *et al.*의 선행연구^[8]에서 수행한 동적실험결과를 바탕으로 도입 볼트 장력을 변수로 실험체를 추가하였으며 유한요소해석프로그램(OpenSees)을 사용하여 마찰댐퍼의 이력거동 모델 제시 및 마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조의 비선형 해석을 수행하였다.

2. 진동대 실험

2.1 실험체 설계

선행연구에서는 KBC 2016의 비내진 상세로 설계된 1층 1경간 무보강 철근콘크리트 골조 실험체(이하 NS)를 제작하고 마찰댐퍼의 설치 형태를 변수로 동적실험을 수행하였다. Fig. 1은 대각 가새형 마찰댐퍼로 보강된 기둥 순 높이 2,750 mm, 보 스패ンは 2,900 mm인 철근콘크리트 보통모멘트 골조 실험체(NS-BF)이다. 콘크리트의 압축강도(f_{ck}) 21 MPa, 철근의 항복강도(F_y) 400 MPa로 제작하였으나 재료시험 결과 콘크리트 압축강도는 평균 16.9 MPa로 나타났다. 마찰댐퍼는 SS275 강재를 사용하여 별도의 면 처리를 하지 않은 흑피상태의 H형강(200×200×8×12)의 플랜지와 PL-12 강재 플레이트를 M20(F10T) 고장력 볼트 8개를 사용하여 2면 전단으로 마찰 접합하였다. Table 1은 실험체 일람표로 마찰댐퍼 볼트의 초기도입장력을 변수로 2개의 실험체를 계획하였으며 설계미끄럼강도(R_n)는 KS 강구조설계기준^[9]의 식 (1)에 따라 계산하였다. 흑피 상태의 미끄럼계수(μ)를 0.4로 산정하였으며, 장슬롯 구멍의 강도감소계수(ϕ) 0.7을 적용하였다.

NS-BF1 실험체는 8개의 볼트에 M20 고장력볼트의 설계볼트장력인 165 kN의 약 25 %인 40 kN씩 도입하여 179.2 kN의 강도를 가질 수 있도록 설계하였으며, NS-BF2 실험체는 설계볼트장력의 약 40 %인 65 kN씩 도입하여 291.2 kN의 미끄럼강도를 가질 수 있도록 대각 가새의 하단 마찰댐퍼부에 토크렌치를 사용하여 장력을 도입하였다. 골조와 대각 가새의 상단 접합부는 각 볼트를 165 kN의 설계볼트장력을 100 % 도입함으로써 지진 하중으로 인한 골조의 변위 발생시 하단부에서 마찰거동이 발생할 수 있도록 설계하였다.

$$R_n = \mu h_f T_0 N_s \quad (1)$$

여기서, R_n : 미끄럼강도(kN)

μ : 미끄럼계수

h_f : 필러계수

T_0 : 도입볼트장력(kN)

N_s : 전단면의 수.

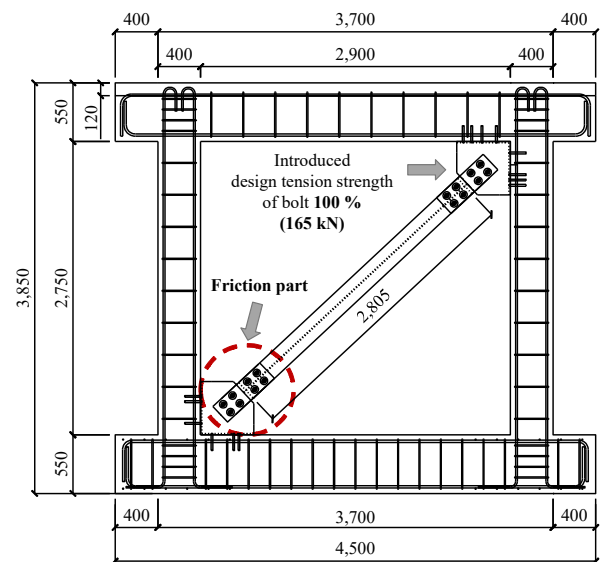


Fig. 1. Reinforced with brace friction damper (NS-BF)

Table 1. List of specimen

Specimen	Arrangement of reinforcement	Bolt size of friction damper	Number of bolts	Design tension strength of bolt T_0 (kN)	Initial tension (per bolt, kN)	Sliding strength R_n (kN)
NS	Non-seismic designed RC moment frame	-	-	-	-	-
NS-BF1		M20 (F10T)	8	165	40	179.2
NS-BF2					65	291.2

Fig. 2는 마찰댐퍼의 볼트 접합부 상세도면으로 H형강의 플랜지와 강재 마찰 플레이트에는 볼트 구멍을 장슬롯(22×50)으로 천공하여 ± 15 mm의 변위에도 볼트 구멍에 지압이 발생하지 않도록 하였다. 또한 표준 와셔와 같은 강도의 대와셔를 자체 제작하여 볼트 구멍 주변의 마찰 면적을 넓힐 수 있도록 하였다.

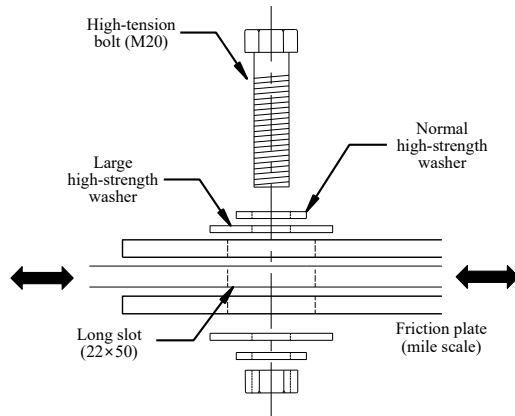


Fig. 2. Basic configuration of each friction unit of the damper

2.2 진동대 실험수행

동적실험은 KOLAS, KEPIC 공인 인증을 받은 진동대를 보유한 부산지진방재센터에서 수행하였다. Figs. 3-4는 진동대 위에 설치된 실험체 전경이다. 220 kN의 하중 블록을 실험체 상부에 적재하고 상부 보 중심과 기둥 하부에 LVDT를 설치하여 층간 변위를 측정하였으며 가속도계를 설치하여 실험체 상·중·하단과 진동대 바닥에서의 가속도를 측정하였다. 실험체의 밀면전단력은 진동대 하단부 4개의 전단 로드셀에서 측정된 데이터를 활용하였으며 영상분석을 통한 변위 측정을 위해 골조와 마찰댐퍼에 패턴을 부착하였다.

최근 경주·포항에서 발생한 국내 지진파는 강진지속시간이 10초 내외로 짧아 실험체에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 예상되며 마찰댐퍼의 동적거동을 파악할 수 없다고 판단하여 적절한 인공지진파를 생성하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 인공지진파는 Fig. 5와 같이 국토교통부 KDS 17 10 00 건축물 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼(S4지반 기준, 내진등급 1등급, 유효지반가속도 0.22 g)과 유사한 응답 특성을 가지며 최대 PGA(peak ground acceleration) 0.236 g, 강진지속시간은 약 20초 정도인 특징을 가진다. 실험은 지진파 크기를 50%(0.118 g) - 300%(0.254 g)까지 증가시키며 가진하였다.



Fig. 3. Experimental setup for shaking table test (NS specimen)



Fig. 4. Experimental setup for shaking table test (NS-BF specimen)

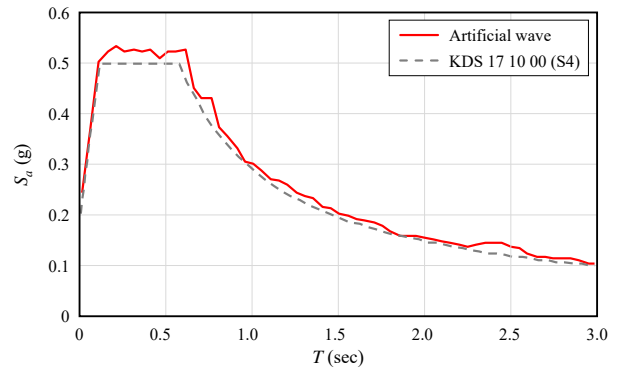


Fig. 5. Response spectrum of artificial wave ($\xi = 0.5$)

2.3 동적실험결과

Fig. 6는 NS, NS-BF1, NS-BF2 실험체의 가진 단계별 최대 밀면전단력과 변위비의 포락곡선을 나타낸 것이다. NS 실험체에서는 190% 가진 시 기둥 하부에 큰 균열이 발생하며 안전상의 문제로 실험을 종료하였으며 최대 약 2.6%의

변위비가 발생하였다. 마찰댐퍼로 보강된 NS-BF1, NS-BF2 실험체는 300 %까지 가진하였을 때 최종 가진 시 약 0.6 %, 약 0.45 %의 층간변위가 발생하여 무보강 실험체 대비 약 75 %의 변위 감소 효과가 있었다. 또한 대각 가새형 마찰댐퍼로 보강된 두 실험체 모두 약 3.79배의 초기 강성 보강효과가 나타났다. Fig. 7은 한국형 인공지진파의 100 %로 가진 시 발생하는 밀면전단력과 지붕층 변위 데이터로 세 개의 실험체 모두 탄성범위 내에서 거동한다. Fig. 8은 실험체의 최대 가진 시 동적 데이터를 정리한 것으로 NS 실험체는 인공지

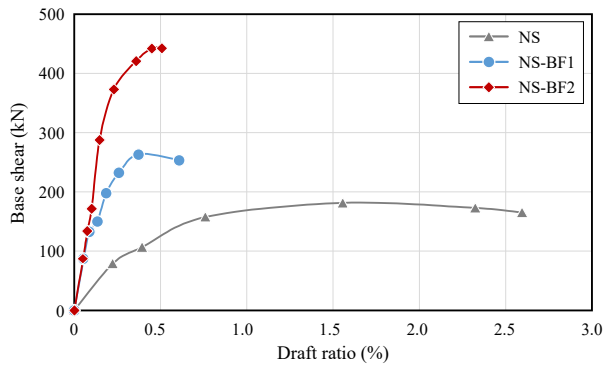


Fig. 6. Base shear force – drift ratio

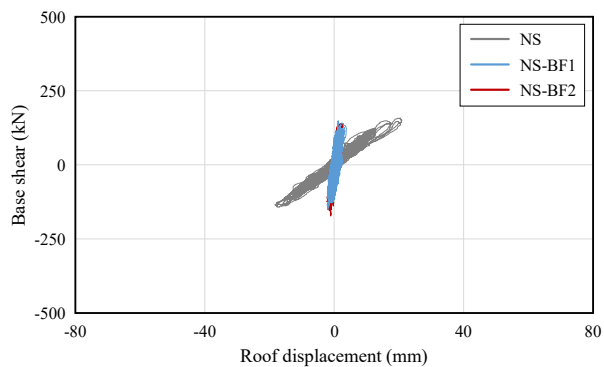


Fig. 7. Base shear – roof displacement of 100 % artificial seismic wave

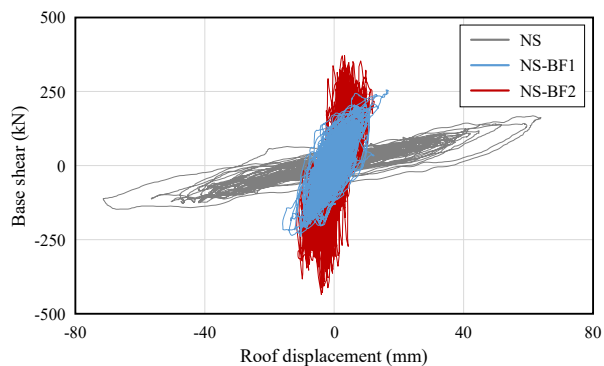


Fig. 8. Base shear – roof displacement of maximum artificial seismic wave

진파의 190 %로 가진하였을 때, NS-BF1, NS-BF2 실험체는 300 %로 가진하였을 때의 밀면전단력과 지붕층 변위 결과이다. 가진 단계별 최대 밀면전단력과 최대 지붕층 변위를 Tables 2-3에서 정리하였다.

Fig. 9은 NS 실험체를 100% 가진 시 골조 상·하부에 설치된 LVDT로 측정된 변위와 실험체에 부착한 패턴을 캠코더로 촬영하여 매트랩으로 영상을 분석한 변위를 비교한 것으로 데이터의 정확도를 비교하기 위해 약 10초간 측정된

Table 2. NS specimen's base shear – drift ratio

Scale		NS	
%	PGA (g)	Base shear (kN)	Drift ratio (%)
50	0.118	79.1	0.223
80	0.189	106.8	0.393
100	0.236	157.7	0.760
150	0.354	181.6	1.556
170	0.401	173.0	2.324
190	0.448	165.4	2.595

Table 3. NS-BF1/NS-BF2 specimen's base shear – drift ratio

Scale		NS-BF1		NS-BF2	
%	PGA (g)	Base shear (kN)	Drift ratio (%)	Base shear (kN)	Drift ratio (%)
50	0.118	85.8	0.053	86.9	0.051
80	0.189	133.4	0.088	134.6	0.076
100	0.236	150.9	0.135	172.5	0.101
150	0.354	198.5	0.185	288.2	0.147
200	0.472	233.0	0.260	373.6	0.230
250	0.590	263.7	0.373	421.5	0.359
300	0.708	254.0	0.609	442.7	0.451
350	0.826	370.7	1.084	443.3	0.509

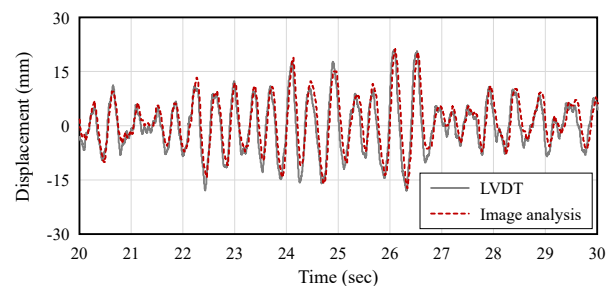


Fig. 9. Comparison of LVDT displacement with image analysis displacement

부분을 확대하였다. 최대변위는 LVDT 20.9 mm, 영상분석 21.1 mm로 유사하게 나타났으며 가진 시간에 따른 골조의 변위 또한 일치하여 측정 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

2.4 마찰댐퍼의 거동 분석

마찰댐퍼의 작동 여부를 분석하기 위해 Table 4에서 NS-BF1, NS-BF2 실험체의 가진 단계별 축방향력을 골조에 작용하는 횡력이 45도 각도로 전달된다고 가정하여 식 (2)를 활용하여 계산하였다. NS-BF1, NS-BF2 실험체 모두 250 % 가진 시 대각 가새에 작용하는 축방향력이 마찰댐퍼의 설계 미끄럼강도(R_n)를 초과함에 따라, 마찰댐퍼가 작동하기 시작한 것으로 분석된다. 진동대 실험 시 골조 하단에 설치한 액션캠으로 댐퍼부를 확대하여 촬영한 영상을 분석한 결과 분석결과와 같이 250 % 이상 가진단계에서 마찰댐퍼가 작동함을 확인하였다.

$$P = F / \cos \theta \quad (2)$$

여기서, P : 대각 가새 축방향력(kN)

F : 골조 횡력

θ : 대각 가새와 하부보의 각도.

Table 4. Axial force of NS-BF1/NS-BF2 specimen

Scale (%)	Axial force (P)	
	NS-BF1	NS-BF2
50	93.81	96.31
80	143.03	150.57
100	144.37	191.34
150	185.80	330.59
200	207.15	410.72
250*	224.31	448.32
300*	164.17	459.16

*Friction start

2.5 실험체 균열형상 및 특이사항

마찰댐퍼로 보강된 NS-BF 실험체는 150 % 가진 이후 상부 보의 휨균열이 주로 발생하였으며, 350 % 가진 이후에는 마찰댐퍼와 골조의 접합부에서 균열이 발생하며 더 이상 댐퍼가 에너지를 소산하지 못하고 골조로 하중이 전달된다고 판단하여 실험을 종료하였다. Fig. 10은 NS-BF2 실험체의

상부 보의 균열과 댐퍼와 골조의 접합부의 콘크리트가 탈락되고 균열이 발생한 사진이다. Fig. 11은 마찰댐퍼부의 표면 상태를 실험 종료 후 촬영한 모습으로 볼트 구멍 주변에 마찰로 인한 마모가 발생하였다. 또한 실험체가 실외에서 비, 습기 등의 영향으로 표면에 녹이 슨 것을 확인하였기 때문에 초기 실험체 설계 시 고려했던 흑피상태의 미끄럼계수(μ)와 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 실험체의 유한요소해석을 수행할 3절에서 마찰댐퍼부의 표면 마감상태 차이를 고려하여 모델링하였다.



(a) Upper beam (b) Drop out of concrete

Fig. 10. Crack of NS-BF2 specimen



Fig. 11. Rusty surface of damper part

3. 실험체의 비선형 해석

3.1 실험체 모델링

3.1.1 철근콘크리트 골조 모델링

앞서 수행한 진동대 실험결과를 토대로 실험체의 비선형 해석을 수행하기 위해 철근콘크리트 골조의 전산해석모델링을 수행하였다. Fig. 12(a)는 무보강 철근콘크리트 골조(NS)의 OpenSees 모델링 개념도이다. 무보강 골조의 전산해석모델은 선행연구에서 신뢰성이 입증된 모델링 방법을 동일하게 적용하였으며 면외 좌굴이 발생하지 않는 2차원 해석으로 수행하였다. 보, 기둥은 nonlinear beam-column 요소를 이용하여 비선형 휨 거동을 모사할 수 있도록 하였으며 단면은 Fig. 12(b), Fig. 12(c)와 같이 fiber section 요소를 사용하

여 콘크리트와 철근의 면적, 배치 등을 정의하였다. 단면은 해석시간과 오차를 줄이기 위해 약축 방향으로 4개, 강축 방향으로 16개로 나누어 section analysis를 수행하였다. 재료 모델로는 OpenSees에서 제공하는 Concrete02 및 Steel02 material을 사용하여 재료실험 결과와 동일하게 입력하였으며 이 모델은 축력과 휨 모멘트간의 상호작용이 반영된다^[10].

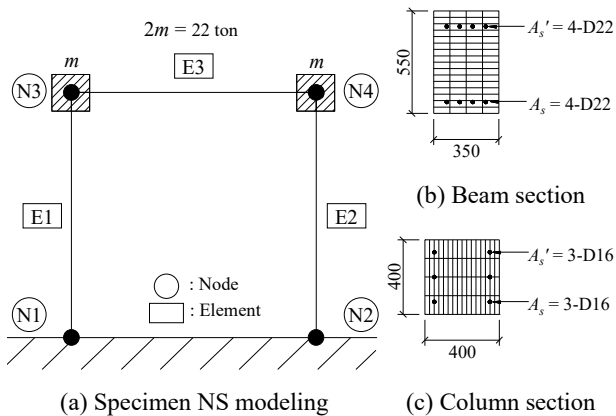


Fig. 12. OpenSees modeling (NS)

3.1.2 대각 가새형 마찰댐퍼 요소 모델링

마찰뎀퍼로 보강된 실험체(NS-BF1, NS-BF2)의 해석을 위해 대각 가새형 마찰뎀퍼 요소 모델링을 먼저 수행하였다. 대각 가새형 마찰뎀퍼부의 실제 이력거동을 분석하면 Fig. 13과 같다. 골조에 지진하중이 가해지면 마찰뎀퍼의 볼트 장력에 의해 설계된 마찰강도 이전까지는 철근콘크리트 골조에 마찰접합된 H형강을 이용하여 대각 가새 보강을 한 것과 같은 효과가 있을 것이다. 그러나 가진 비율이 증가되고 골조에 가해지는 하중이 마찰강도 이상으로 증가함에 따라 마찰면의 슬립이 발생하며 마찰거동이 시작된다. 따라서 이러한 대각 가새형 마찰뎀퍼의 이력거동을 표현할 수 있는 재료모델의 제안이 필요하다.

Ramirez and Tirca^[11]와 Tirca^[12]는 마찰거동을 표현하기 위해 BoucWen material을 사용하고, 마찰댐퍼 볼트 구멍에서 지압 발생 이후의 거동을 ElasticPPGap(elastic-perfectly plastic gap) material을 사용하여 병렬로 연결하였으며, 대각가새를 Steel02 material로 표현하여 마찰댐퍼부 모델과 직렬 연결하였다. Zhang *et al.*^[13]은 HDRB, LRB 등과 같은 고감쇠 고무받침의 해석적 연구를 위한 모델링 과정에서 강재의 에너지소산능력을 표현하기 위한 재료 이력 곡선으로 RambergOsgoodSteel material을 사용하였으며 응력, 변형률 관계를 이용하여 타성 범위에서의 강재 감쇠를 나타내었

다. 그러나 RambergOsgoodSteel material은 항복 응력 이후에서도 응력이 계속 증가하는 특징이 있다.

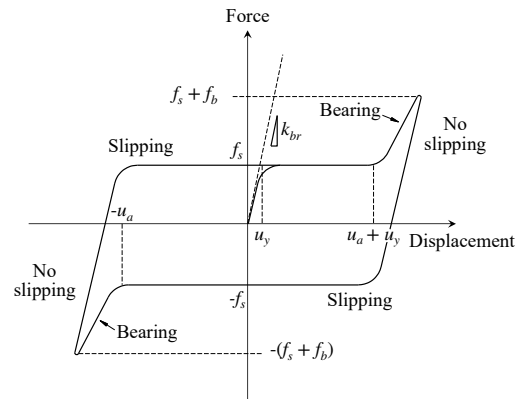


Fig. 13. Hysteresis curve of friction damped diagonal brace

본 연구에서는 실험체 설계 단계에서 마찰댐퍼의 볼트 구멍을 장슬롯으로 제작하여 30 mm의 변위까지 볼트 구멍에 지압이 발생하지 않도록 설계하였고, 인공지진파 300 %가진 이후에도 볼트 구멍에 지압이 발생하지 않았기 때문에 지압 발생 이후 거동에 대해서는 실험체 해석모델에서 고려하지 않았다. 따라서 마찰댐퍼가 설계된 대각 가새 전체를 하나의 부재로 모델링하였으며 OpenSees에서 제공하는 재료모델 중 항복 응력-변형을 곡선을 입력하여 마찰댐퍼의 이력거동을 표현할 수 있는 BoucWen material을 사용하여 동적실험 시 볼트 지압 발생 전의 실험체 이력거동을 구현할 수 있도록 하였다. Fig. 14은 마찰댐퍼 요소모델의 이력곡선과 모델링을 시각화한 것이다. 재료의 항복응력(σ)은 2.1절에서 산정한 마찰댐퍼의 설계미끄럼강도(R_n)를 H형강(200×200×8×12)의 단면적으로 나누어 입력하였으며 초기 강성(K_0)은 Shin *et al.* 선행연구^[14]의 마찰댐퍼 반복가력 실험결과에서 얻은 강성을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 마찰댐퍼와 선행연구 요소실험체는 초기도입장력의 차이는 있으나 H형강의 크기, 전단면의 수, 볼트의 개수 및 크기 등의 설계방법이 동일하기 때문에 선행연구 결과를 바탕으로 마찰댐퍼 요소모델의 신뢰성을 입증할 수 있을 것으로 판단된다. BoucWen material의 항복 응력 이후 강성은 αK_0 로 표현되며, 마찰댐퍼와 같은 이력 거동을 구현하기 위해 α 계수를 0.1로 입력하였다. Fig. 15은 각각 NS-BF1, NS-BF2 실험체에 사용된 마찰댐퍼의 재료모델의 1 cycle 해석결과로 미끄럼강도 179.2 kN, 291.2 kN에서 마찰거동을 시작하는 것을 확인하였다.

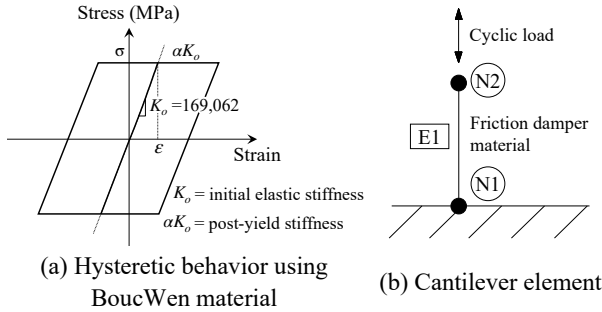


Fig. 14. Modeling of friction element

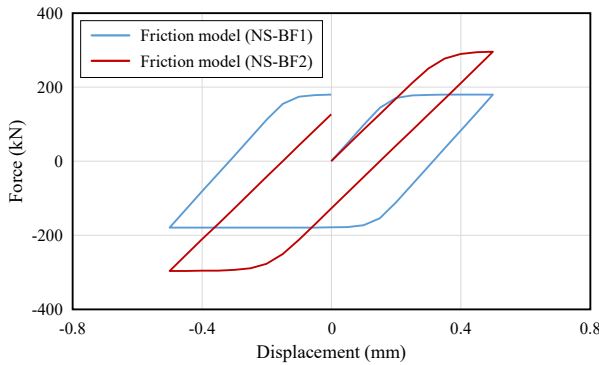


Fig. 15. Friction damper element modeling

3.1.3 마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조 모델링

Fig. 16은 대각 가새형 마찰댐퍼로 보강된 NS-BF 실험체의 모델링 개념도이다. 철근콘크리트 골조 모델 상에는 NS 실험체와 동일하며, 절점 N1과 N4를 연결하는 E4 부재요소를 추가해 앞서 제시한 마찰댐퍼 재료모델을 사용하였다. 마찰댐퍼 강도 모델 설계 시 강재의 마찰계수(μ)를 흑피상태인 0.4로 가정하여 NS-BF1 실험체는 179.2 kN, NS-BF2 실험체는 291.2 kN으로 미끄럼강도를 산정한 반면, 실제 동적실험 시 실험체 강재 표면에 녹이 스 상태로 마찰계수가 0.5로 증가하였을 것이라고 판단하였다. 따라서 NS-BF1 해석모델 마찰댐퍼 요소의 미끄럼강도를 220 kN, NS-BF2 해석모델 약 370 kN으로 입력하였다.

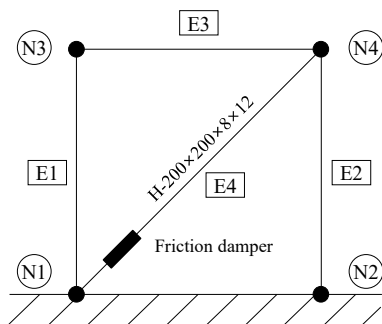


Fig. 16. Reinforced specimen modeling (NS-BF)

3.2 비선형 정적해석 결과

해석모델의 신뢰성을 평가하고 한계상태를 파악하기 위해 비선형 정적해석(push-over analysis)을 수행하였다. Fig. 17은 진동대 실험을 통해 얻은 실험체의 가진 단계별 층간 변위 포락곡선과 해석모델의 비선형 정적해석 결과를 비교한 그림이다. NS 실험체의 경우, 초기강성 및 최대강도가 유사하게 나타남에 따라 철근콘크리트 골조의 모델링이 적절하게 수행되었다고 판단된다. 대각 가새형 마찰댐퍼 요소가 추가된 NS-BF 해석모델에서는 초기강성이 실험체 대비 크게 나타났다. 마찰댐퍼 이력곡선의 초기강성(K_o)을 마찰댐퍼 요소 부재 반복가력실험체(설계볼트장력의 약 50% 도입)를 바탕으로 결정하였기 때문에 설계볼트장력의 약 25%, 40%를 초기강력으로 도입한 동적실험체의 경우 해석모델보다 강성이 낮게 나온 것으로 분석하였다. 또한 동적실험에서 철근콘크리트와 댐퍼의 연결부에서 큰 균열이 발생하여 더 이상 댐퍼가 거동하지 않는다고 판단하여 실험을 종료하였기 때문에 최대 강도는 해석모델에서 더 크게 나타났다.

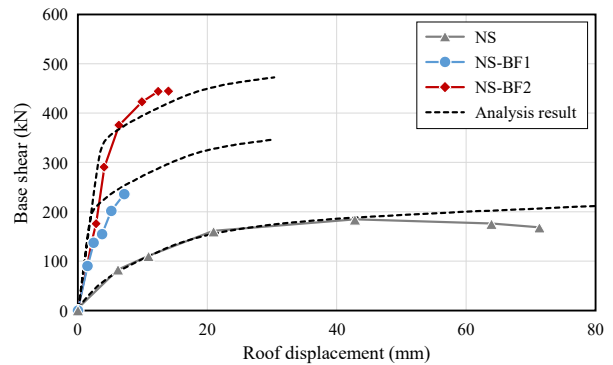


Fig. 17. Envelope curve and push-over result

3.3 비선형 시간이력해석 결과

비선형 정적해석을 통해 해석모델의 신뢰성을 입증한 후, 인공지진파 가속도 데이터를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석의 오차를 줄이고자 인공지진파를 가진 한 동적실험 시 실험체 별 진동대 바닥에서 측정된 가속도 데이터를 사용하였다. Fig. 18은 인공지진파 100% 가진 시 동적실험결과와 비선형 시간이력 해석결과를 비교한 결과이다. NS실험체의 경우 약 20초까지 실험결과와 해석결과와의 시간별 최대 변위가 유사하나 20초 이후부터 변위차가 발생하였다. 동적실험 시 철근콘크리트 골조의 연속적인 가진으로 인한 균열 발생 및 손상 누적에 의해 해석모델에 비

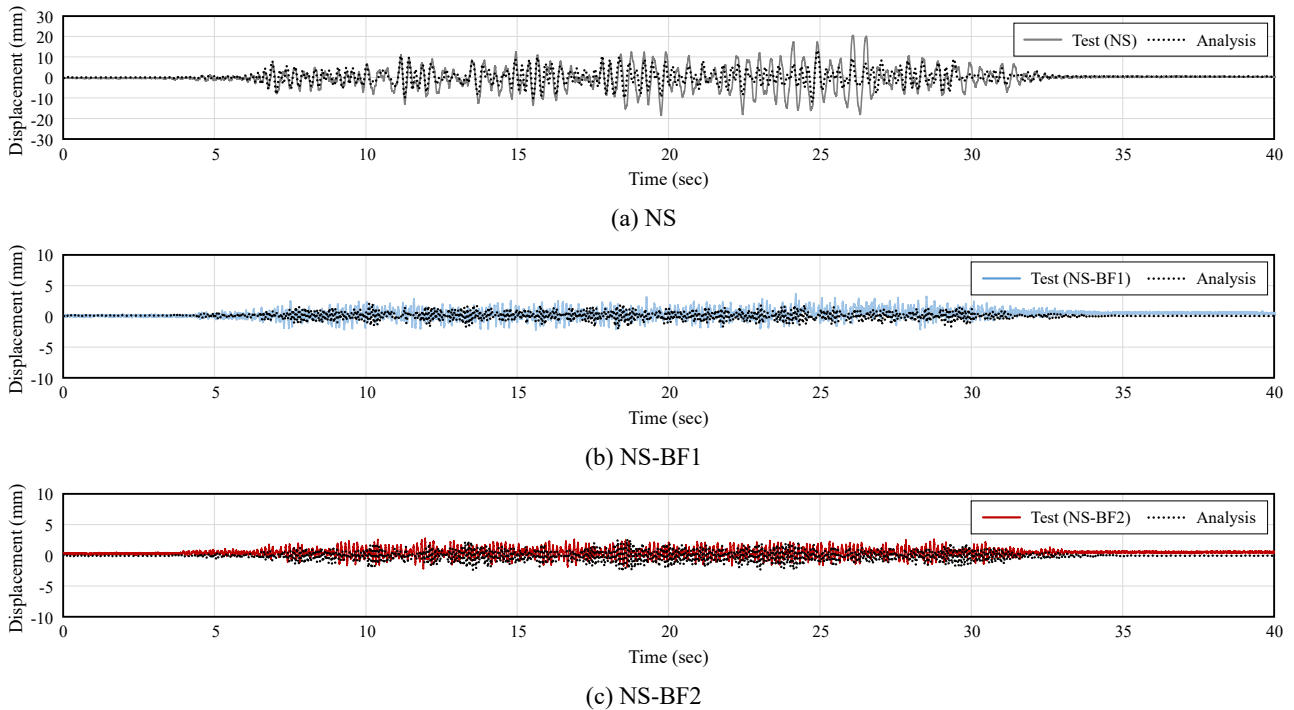


Fig. 18. Time-history analysis result using 100 % seismic excitation of artificial wave

해 변위가 크게 나타난 것으로 판단된다. 대각 가새형 마찰 댐퍼로 보강된 NS-BF 실험체는 100 % 가진 시 최대 변위가 약 3 mm(drift ratio 약 0.1 %) 발생하여 해석모델에서 정확하게 시간에 따른 변위를 일치시키는 것은 불가능하나, 전체적인 거동이 유사하게 나타난 것을 볼 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 국내에서 발생한 지진과 유사한 응답 특성을 가지는 인공지진파를 가진하여 대각 가새형 마찰 댐퍼의 도입장력을 변수로 한 철근콘크리트 실험체의 동적거동을 분석하고 마찰댐퍼의 이력 거동을 표현할 수 있는 모델을 적용한 실험체의 비선형 해석을 수행하였다.

- (1) 무보강 NS 실험체의 경우 기둥 하부에 균열이 집중되며 콘크리트가 탈락하는 현상이 발생하여 190 % 가진 후 실험이 종료되었으며, 마찰댐퍼로 보강한 NS-BF1, NS-BF2 실험체의 경우 상부보의 휨 균열, 대각 가새와 보 접합부 균열 발생으로 인해 350 % 가진 후 실험이 종료되었다.
- (2) 마찰댐퍼로 보강된 NS-BF1, NS-BF2 실험체는 300 %

가진 시 약 0.6 %, 약 0.45 %의 층간변위가 발생하였으며 NS 실험체 대비 약 75 %의 변위 감소 효과가 있었다. 또한 마찰댐퍼로 보강된 실험체에서 약 3.79배의 초기강성 보강효과가 나타났다.

- (3) 초기도입장력을 변수로 설계한 실험체의 동적거동 특성을 토대로 추후 기존 철근콘크리트 건축물의 내진보강 계획 시, 골조에 손상이 발생하기 전 마찰댐퍼가 거동하기 위해 고장력 볼트의 크기, 개수, 초기도입장력, 마찰면 처리를 변수로 적절한 설계강도 산정이 필요할 것으로 사료된다.
- (4) 선행연구된 마찰댐퍼의 요소실험결과와 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 OpenSees를 이용한 모델링 및 비선형 해석을 수행하였으며, NS 실험체의 해석과 실험의 결과가 유사하게 거동함에 따라 철근콘크리트 골조 해석 모델링의 신뢰도를 확보하였다.
- (5) 마찰댐퍼의 이력 거동을 표현하기 위해 RambergOsgoodSteel material을 사용하여 모델링한 NS-BF1, NS-BF2 실험체의 해석 결과, 동적실험결과보다 초기강성이 더 크게 나타났고 이는 해석의 초기도입장력으로 동적실험체가 아닌 요소실험체의 초기도입장력을 적용했기 때문으로 판단되며 최대강도와 변위, 비선형 거동은 전체적으로 유사하게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다(This research was supported by Kyungpook National University Development Project Research Fund, 2019),

참고문헌(References)

- [1] The Korean Structural Engineers Association (2018) *White Paper on 11-15 Pohang Earthquake*, KSEA, Korea (in Korean).
- [2] Lee, M.-H., Oh, S.-H., and Yoon, M.-H. (2009) Energy Absorption Capacity of X-Type Braced Frame with Steel Plate Slit Dampers, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.25, No.11, pp.53-60 (in Korean).
- [3] Ahn, T.-S., Kim, Y.-J., Park, J.-H., Kim, H.-G., Jang, D.-W., and Oh, S.-H. (2012) Experimental Study on a Cantilever Type Metallic Damper for Seismic Retrofit of Building Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.2, pp.149-161 (in Korean).
- [4] Mualla, I.H., and Belev, B. (2002) Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device Under Earthquake Excitation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.24, No.3, pp.365-371.
- [5] Pall, A.S., and Marsh, C. (1982) Seismic Response of Friction Damped Braced Frames, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.108, No.6, pp.1313-1323.
- [6] Filiatrault, A., and Cherry, S. (1990) Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.116, No.5, pp.1334-1355.
- [7] Sano, T., Shirai, K., Suzui, Y., and Utsumi, Y. (2019) Loading Tests of a Brace-Type Multi-Unit Friction Damper Using Coned Disc Springs and Numerical Assessment of Its Seismic Response Control Effects, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Springer, Vol.17, No.9, pp.5365-5391.
- [8] Shin, H.-M., Lee, H.-D., Lee, S.-W., and Shin, K.-J. (2020) Shaking Table Test of Reinforced Concrete Frame with Friction Damper Using Short-Cycle Response, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.169-178 (in Korean).
- [9] KSSC (2018) *Design of Steel Structures (for New KS Standard)*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [10] Pacific Earthquake Engineering Research Center (2009) *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*, University of California, Berkely, USA, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [11] Ramirez, J.D.M., and Tirca, L. (2012) Numerical Simulation and Design of Friction-Damped Steel Frame Structures, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica (Portuguese Society for Earthquake Engineering), Portugal.
- [12] Tirca, L. (2015) *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Friction Dampers for Seismic Protections of Steel Buildings Subjected to Earthquakes: Emphasis on Structural Design, Springer, German, pp.1058-1070.
- [13] Zhang, H., Han, Q., Wang, Y., and Lu, Y. (2016) Explicit Modeling of Damping of a Single-Layer Latticed Dome with an Isolation System Subjected to Earthquake Ground Motions, *Engineering Structures*, Elsevier, pp.154-165.
- [14] Shin, H.M., Lee, H.D., and Shin, K.J. (2019) Measurement of Bolt Tension of Friction Damper Using Manufactured Load Cell, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.171-178 (in Korean).

요약: 국내 지진발생 빈도가 증가함에 따라 기존 건축물의 내진성능 평가 및 보강방법 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 마찰댐퍼는 고장력 볼트의 강력한 조임력에 의해 발생하는 마찰력으로 응력을 전달하여 접합부의 강성이 높고 설치가 간편하다. 따라서 본 연구에서는 비내진 설계된 철근콘크리트의 마찰댐퍼 초기도입장력을 변수로 하여 국내 지진파 특징과 유사한 단주기 응답특성을 갖는 인공지진파에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 OpenSees를 사용하여 마찰댐퍼의 이력거동 모델 제시 및 마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조의 비선형 해석을 수행하였다.

핵심용어: 마찰댐퍼, 동적 실험, 비선형 해석, 내진보강, 강재댐퍼
