



강재슬릿댐퍼를 이용한 필로티 건축물의 내진성능평가

신혜민¹ · 이희두² · 신경재^{3*}

¹박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부 건축공학전공, ²전임연구원, 경북대학교, 건설안전기술연구소,

³교수, 경북대학교, 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of Building with Piloti using Steel stilt damper^{*}

Shin, Hye-Min¹, Lee, Hee Du², Shin, Kyung Jae^{3*}

¹Ph.D Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

²Research Fellow, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

³Professor, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

Abstract - On November 15 2017, the second strongest earthquake occurred in Pohang, which was 5.4 in size. The duration of the earthquake was short, but the damage was serious. In this study, reinforcing effect of steel slit damper was analyzed based on the dynamic test results of the previously studied reinforced concrete frame. After that, push over analysis and nonlinear time history analysis using OpenSees were selected for the residential building with piloti as the target building, and the total deformation of the structure, the plastic rotation angle of the member end and the shear force of the column were evaluated.

Keywords - Piloti, Steel slit damper, OpenSees, Nonlinear analysis, Time history analysis, Seismic

1. 서론

2016년 9월 12일 국내 지진계측이래 가장 강한 규모 5.8의 경주 지진은 지속시간이 10초 이내로 짧은 편이었지만 640여 차례의 크고 작은 여진들로 경주, 울산, 대구 및 부산지역뿐만 아니라, 서울 일부지역까지도 상당한 진동이 전파되어 국민들의 불안감이 고조되었다. 경주 지진의 여운이 가라앉으려는 시점인 2017년 11월 15일 경북 포항시에서 규모 5.4의 국내에서 두 번째로 강한 지진이 발생하였으며 강진 지속시간은 약 4초~6초로 짧았으나 그 피해의 규모는 9.12 경주지진과는 비교할 수 없을 만큼 심각했다. 포항지진의 경우 최대지반가속도가 0.26g로 경주지진에 비해 훨

씬 작은 규모지만 진원의 깊이가 9km로 얕고 인구밀집도가 높은 지역에서 발생하여 실제 시민들이 느끼는 진동과 피해는 더 컸으며, 지금까지 국내에서 발생한 지진 중 최대의 피해를 유발하였다.

지진 피해의 확산은 국내 전체 건축물 700만동 중 내진이 확보된 건축물 47만동과 같은 낮은 내진율(6.8%)과 지진에 취약한 필로티 원룸 건축물의 밀집지역에 진원이 위치하였기 때문이다. 본 연구에서는 선행 연구에서 수행한 진동대 실험 결과를 바탕으로 OpenSees를 이용하여 실험체를 모델링하여 비선형 정적해석 및 시간이력해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 강재 슬릿 댐퍼 모델링의 신뢰성을 입증하였다. 그 후 포항시에 위치한 주거용 필로티 건축물을 대상으로 국내외 지진에 대한 비선형 해석을 통해 내진성능평가를 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 취약부위를 파악하고 강재 슬릿 댐퍼를 이용한 내진보강을 실시한 것으로 가정하여 대상건물의 내진성능을 재평가 하였다.

Note.-Discussion open until April 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 20, 2018; revised August 28, 2018; approved on September 17, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-10-8802-0246 Fax. +82-53-950-6590

E-mail. shin@knu.ac.kr

2. 지진파 분석

2.1 경주지진의 구조공학적 분석

9.12 경주지진은 리히터 규모 5.8, 모멘트 규모 5.5, 진원 깊이는 15km로 약 640회의 여진이 추가적으로 발생되었다. (2017, 기상청) 본 논문에서는 지질자원연구원(KIGAM)과 기상청 국가 지진종합시스템 NECIS (KMA)에서 제공한 명계리(MKL), 덕정리(DKJ), 울산(USN) 3개 관측소의 가속도 기록을 사용하여 지진파를 분석하였다. Table 1은 경주지진의 관측소 위치 및 지반조건, 가속도계 정보이며 Table 2는 관측소별 100Hz 샘플링 데이터를 이용하여 최대지반가속도를 정리한 것이다. 진앙지와 관측소의 거리는 명계리(MKL) 5.9km, 울산(USN) 8km, 덕정리(DKJ) 22km 이다.

Table 1. Observatory Information (Gyeongju)

Station	Soil condition	Latitude	Longitude	Accelerometer
MKL	S _B	35.73	129.24	ES-T
DKJ	S _B	35.70	129.12	ES-T
USN	S _C	35.95	129.11	CMG-5T

Table 2. Gyeongju Earthquake PGA, EPGA, S_a(1.0) (g)

Station	Component	PGA (g)	EPGA (g)	S _a (1.0) (g)
MKL	E-W	0.346	0.153	0.031
	N-S	0.275	0.164	0.053
DKJ	E-W	0.091	0.039	0.016
	N-S	0.098	0.084	0.026
USN	E-W	0.400	0.293	0.031
	N-S	0.430	0.192	0.026

Fig. 1.은 경주지진의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 경주지진은 주기 0.1초 전후에서 응답스펙트럼 가속도 값이 크게 나타나고 그 후 급격히 감소하기 때문에 단주기를 가지는 1~3층의 저층 구조물이 많은 영향을 받게 될 것으로 분석할 수 있다. 또한 단주기 구조물이더라도 강진 지속시간이 길지 않았기 때문에 지진하중에 의한 변형이 크지 않아 건설연도가 오래된 비내진 저층 구조물이 주로 피해를 입었다. (Lee et al., 2016)

2.2 포항지진의 구조공학적 분석

11.15 포항지진은 리히터규모 5.4로 9.12 경주지진보다 지진

에너지의 크기는 작았지만 진원의 깊이가 9km로 매우 얇고 인구

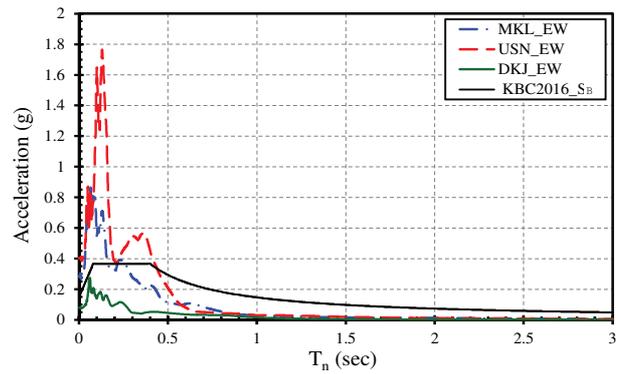


Fig. 1. Response spectrum of Gyeongju earthquake

밀집지역이라는 것에서 인명피해와 시설물의 파괴는 매우 크게 나타났다. 포항지진 가속도 계측은 기상청(KMA)에서 제공하는 포항 (PHA2)관측소와 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 제공하는 청송 (CHS), 학계리 (HAK), 덕정리 (DKJ)관측소로 총 4개 관측소의 가속도 데이터를 이용하였다. Table 3, 4에서 포항지진 관측소 정보와 100Hz 샘플링 데이터를 분석하여 정리하였다. 진앙지와 관측소의 거리는 포항 (PHA2) 9km, 학계리 (HAK) 23km, 청송 (CHS) 25km, 덕정리 (DKJ) 28km 이다. 피해를 크게 입은 흥해읍의 가속도 기록은 존재하지 않지만 소프트한 지반으로 알려져 있기 때문에 포항관측소 계측가속도와 마찬가지로 지반증폭이 유발되어 피해가 있었을 것으로 예측할 수 있다.

Table 3. Observatory Information (Pohang)

Station	Soil condition	Latitude	Longitude	Accelerometer
CHS	S _B	36.3919	129.0794	ES-T
HAK	S _B	35.9296	129.5004	ES-T
DKJ	S _B	35.9468	129.1089	CMG-5T
PHA2	Unknown	36.1930	129.3708	ES-T

Table 4. Pohang Earthquake PGA, EPGA, S_a(1.0) (g)

Station	Component	PGA (g)	EPGA (g)	S _a (1.0) (g)
CHS	E-W	0.021	0.016	0.003
	N-S	0.027	0.018	0.003
HAK	E-W	0.026	0.025	0.015
	N-S	0.036	0.035	0.015
PHA2	E-W	0.150	0.121	0.057
	N-S	0.244	0.142	0.208
DKJ	E-W	0.025	0.014	0.004
	N-S	0.047	0.030	0.009

Fig. 2.는 포항지진의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 응답스펙트럼가속도는 진원지와 가장 가까운 포항관측소 가속도만 설계 응답스펙트럼을 초과하였으며 지진파의 에너지가 0.5초 주기 근방에 집중되어 나타났다. 0.5초의 기본주기를 갖는 구조물은 3~5층 정도의 다세대 공동주택이 대표적이며 이는 포항지진 피해사례에서도 많이 나타났다.

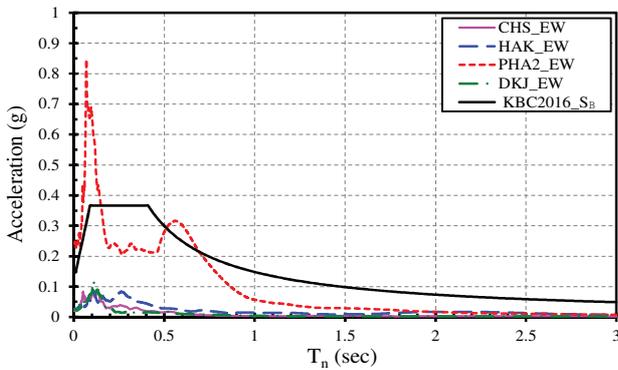


Fig. 2 Response spectrum of Pohang earthquake

2.3 국외 지진파와의 비교

최근 국내에서 발생한 경주, 포항 지진은 단주기 고주파 특성을 가지며 그동안 연구에 사용되었던 국외지진파는 차이를 보였다. Fig. 3.에서 경주, 포항 지진의 응답스펙트럼과 국외지진의 응답스펙트럼을 비교해보았다.(Fajfar, 2000) 지진파에 의한 구조물의 영향을 분석하였을 때, 경주지진은 5Hz 이상의 고주파수 영역에 집중되어있어 1~2층의 저층 구조물에 영향을 미칠 것으로 판단되며 포항지진은 2Hz 부근의 비교적 낮은 주파수영역에 분포하여 3~5층 구조물에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 국내지진의 경우 국외지진보다 지속시간이 짧고 단주기 특성을 갖는 것으로 분석되었다.

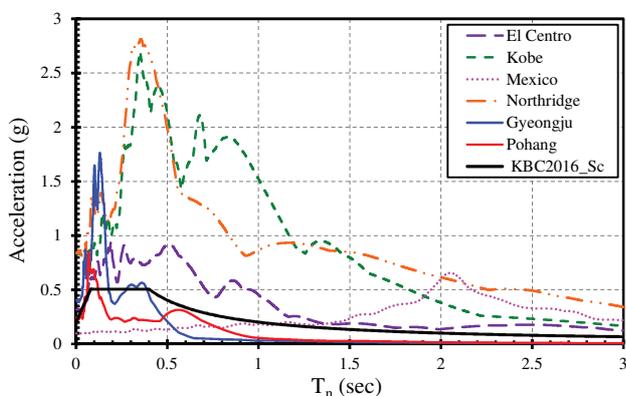


Fig. 3. Response spectrum of domestic and overseas earthquakes

3. 선행 연구 요약

3.1 실험 계획

3.1.1 실험체 계획

강재 슬릿 댐퍼의 응답특성을 분석하고 보강효과를 평가하고자 선행연구(shin *et al.*, 2016)에서는 비내진 상재로 설계된 비보강 RC프레임과 강재슬릿댐퍼로 보강된 프레임의 동적실험을 수행하였다. Fig. 5.는 1층 1경간의 문형 골조 형태(이하 NS)의 기둥 순높이 2,750mm, 보 스팬은 2,900mm인 철근콘크리트 보통모멘트 골조이다. Fig. 6.은 창호형태의 강재 슬릿 댐퍼로 보강한 실험체(이하 NS-D)로 댐퍼와 댐퍼 지지부로 구성되며 댐퍼의 내력을 RC골조의 60%로 설계하여 댐퍼에 손상을 집중시켜 구조물의 손상을 저감시키는 시스템이다. 실험체의 실제 모습은 Fig. 4.와 같다.



Fig. 4. Specimen NS and NS-D

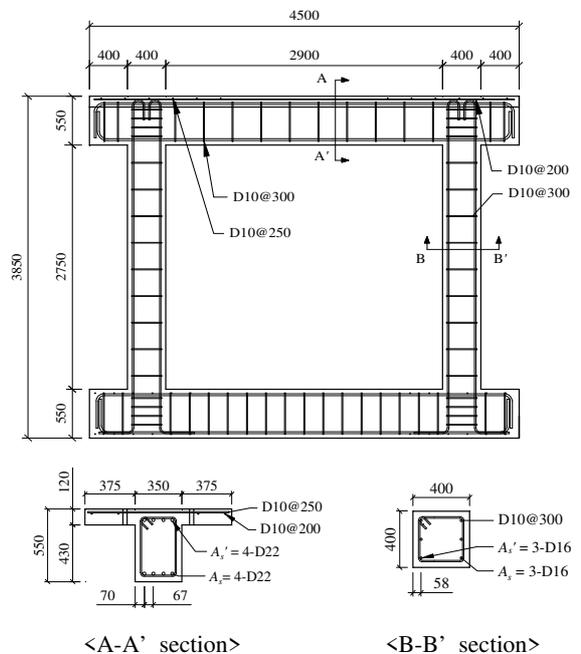


Fig. 5. Non-seismic reinforcement (NS)

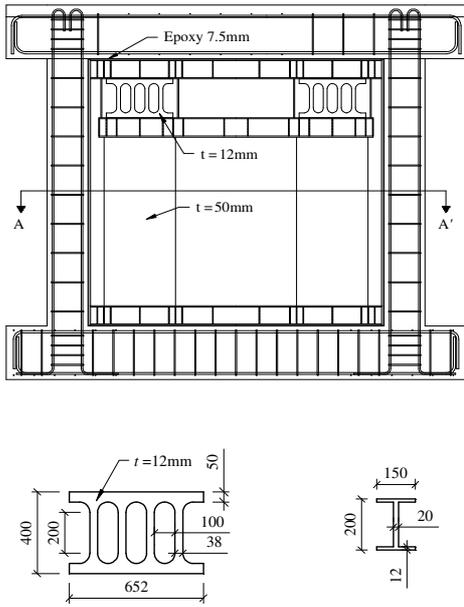


Fig. 6. Steel plate slit damper reinforcement (NS-D)

3.1.2 실험 결과 분석

진동대 실험은 지진방재연구센터에서 수행하였으며 22ton의 하중블록을 하중으로 El Centro 지진파를 이용하여 10%에서 300%까지 1방향 가진하였다. Fig. 7.은 100% 가진 시 실험체의 밀면전단력과 층간변위응답을 나타낸다. 변위의 경우 NS 실험체는 1.99초에서 0.48%, NS-D 실험체는 2.18초에서 0.14%로 강재 슬릿 댐퍼 보강 시 71%의 변위감소효과가 있었으며 강재슬릿 댐퍼로 보강한 프레임의 강성은 약 1.3배 증가하였다.

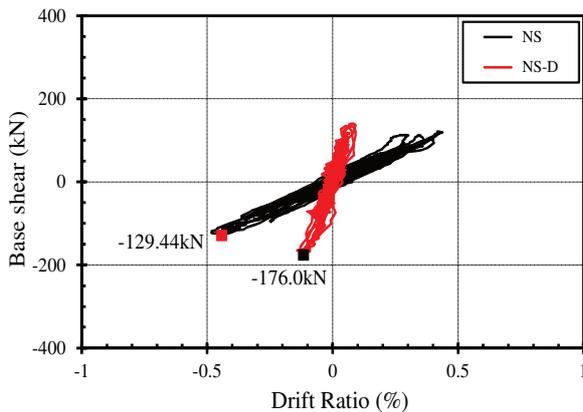


Fig. 7. Base shear force - drift ratio response curve of specimens (100%)

4. 전산 해석

4.1 실험체 OpenSees 해석 모델

4.1.1 NS 실험체 모델링

실험체 모델링은 2차원으로 수행하였으며 보, 기둥은 비선형 휨 거동을 모사하기 위하여 'NonlinearBeamColumn' 부재요소를 사용하였고 단면요소는 'Fiber Section'을 사용하여 Section analysis를 수행하였다. 실험체 상부에 적재한 22ton의 하중블록은 N3, N4 절점에 각 11ton씩 분배하여 입력하고 골조의 자중은 E3 보 부재에 등분포하중으로 작용하게 하였다. Fiber 요소는 콘크리트와 철근의 면적, 축, 응력-변형률 관계를 정의해 주어야 하며 OpenSees에서 제공하는 재료모델인 concrete02 와 steel02 를 적용하여 실제 실험체의 단면과 동일하게 모델링하여 축력과 휨 모멘트간의 상호작용이 자동으로 반영되도록 하였다.(PEER, 2009)

4.1.2 NS-D 실험체 모델링

강재 슬릿 댐퍼로 보강된 NS-D 실험체의 모델링의 경우 기본 골조는 NS실험체와 같은 방식으로 모델링하였으며 내진보강시스템인 댐퍼 및 댐퍼지지부의 내력을 계산하여 각 부분을 Element로 치환하는 방법을 사용하였다. Fig. 9.에서 E5, E7 부재는 강재 슬릿댐퍼가 고정되는 H형강으로 강성을 무한대로 입력하였다. E8 부재는 댐퍼를 지지하는 폭 700mm, 두께 50mm의 플레이트 2개를 치환한 것으로 단면특성을 그대로 입력하여 모델링하였다. E6 부재는 강재슬릿댐퍼로 댐퍼 기둥 하나의 내력(M_p)을 계산한 후 총 8개의 댐퍼 내력을 하나의 부재에 입력해주었다.

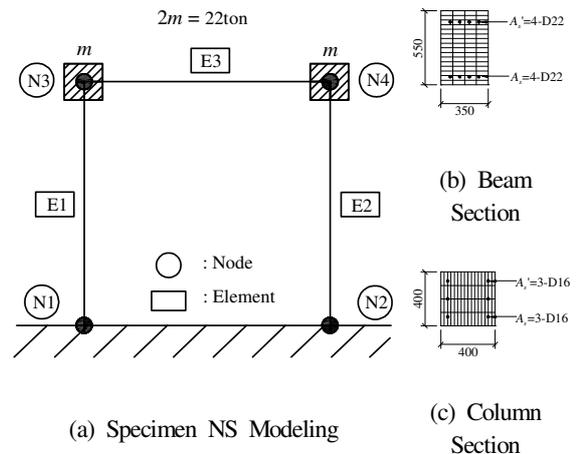


Fig. 8. OpenSees Modeling (NS)

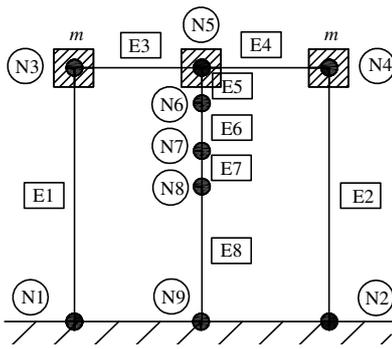


Fig. 9. OpenSees Modeling (NS-D)

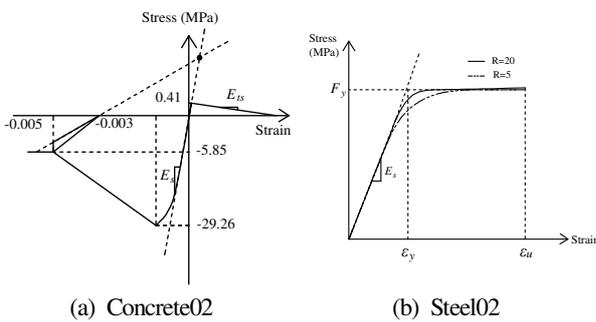


Fig. 10. Material Models of OpenSees

4.2 비선형 정적해석

해석모델의 비선형 시간이력을 수행하기 전 기본적인 비선형 거동특성을 알아보기 위하여 Push over 해석을 수행하였다. Fig.11.은 실험 결과의 최대 층간 변위비를 연결한 backbone curve와 OpenSees를 이용한 Push over 해석 결과를 비교 한 것이다. 전체적인 역량곡선이 실험 결과와 유사하다고 볼수 있어 해석모델의 신뢰성을 입증하였다.

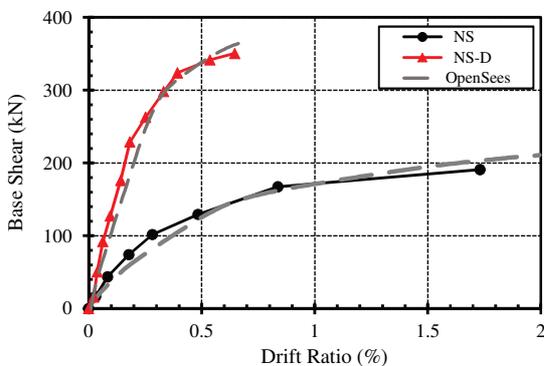


Fig. 11. Comparison of experimental result and OpenSees analysis result (maximum)

4.3 비선형 시간이력해석

정적해석을 통해 신뢰성을 입증한 모델링을 바탕으로 비선형 시간이력해석을 수행하였다. (Chopra, 2012) 해석의 오차를 줄이기 위하여 실제 지진파가 아닌 실험체 별 진동대에서 측정된 El Centro 100% 가진 시 지진파를 사용하였다. Fig. 12.는 100% 가진 시 동적실험 결과와 비선형시간이력해석 결과를 비교한 것이다. 실험결과와 시간에 따른 변위차는 있었으나 최대 변위 및 전체적인 거동이 유사하게 나타났다.

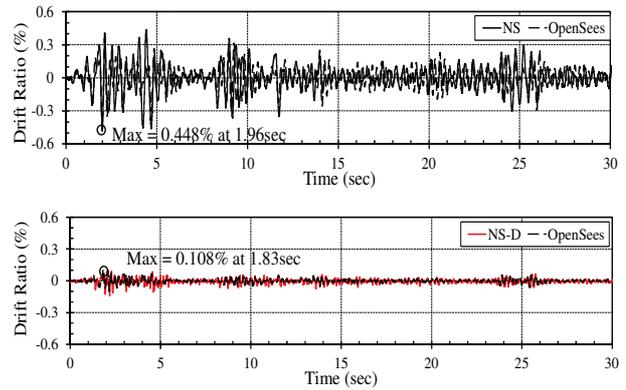


Fig. 12. Drift ratio during the simulation of 100% seismic excitation of El Centro earthquake

5. 필로티 건축물의 내진성능평가

5.1 대상건물 개요

필로티 건물의 내진성능을 평가하기 위해 경상북도 포항시에 위치한 다세대 주택 건물을 대상 건물로 선정하였다. 대상건물은 2011년에 건설된 지상 4층 규모의 RC 보통전단벽 구조이다. Fig. 13., 14.는 대상건물의 평면도와 기둥 배근도이다.

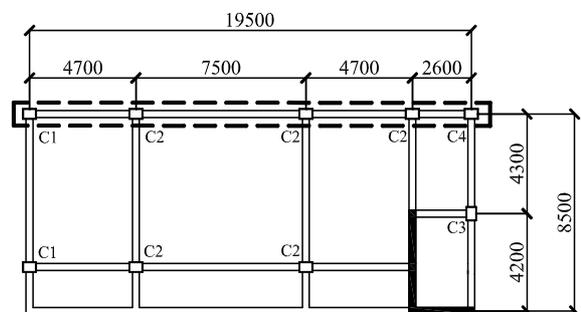


Fig. 13. Target Building Floor Plan

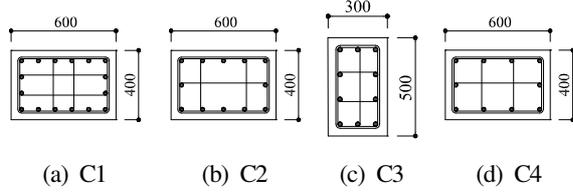


Fig. 14. Column Section

5.2 대상건물 모델링

필로티 건물의 전산해석을 수행하기 위해 모델링을 수행하였다. 횡력에 대한 필로티형 건물의 거동특성상 상부벽체부분은 거의 강체거동을 하고 실제 대부분의 횡변형은 하부 골조부분에 집중된다.(Go et al., 2009) 따라서 해석시간과 오류를 줄이기 위해 손상이 거의 발생하지 않을 것으로 예상되는 상부 벽체 부분은 Elastic Beam Column 부재를 이용하여 탄성강체로 모델링하였으며 하부 골조는 Fiber Section, Nonlinear Beam Column 비선형부재로 상세히 모델링하였다. 필로티형 건물에 대하여 상부 벽체를 탄성부재로 모델링하는 방법은 기존 연구 (Lee et al., 2013)에서 실험을 통해 입증되었다. Fig. 15.는 필로티 모델링을 시각화하여 나타낸 것이다.

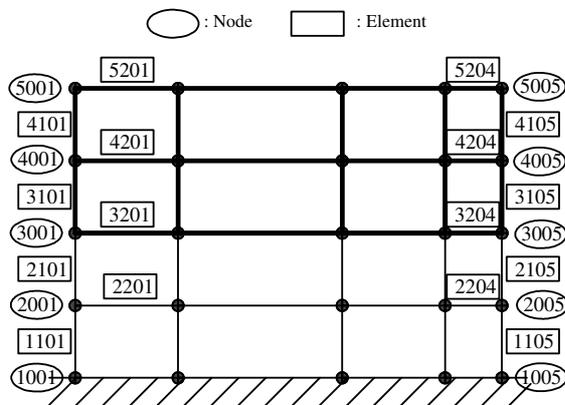


Fig. 15. Modeling of Piloti

5.3 비선형 정적해석

필로티 건물의 기본적인 비선형 거동을 파악하기 위해 KBC2016의 등가정적해석법에 따라 Push over 해석을 수행하였으며 층별 횡하중은 1층 30,810N, 2층 61,620N, 3층 92,430N, 4층 123,240N으로 산정되었다. Fig. 16.은 Push over 해석 결과 밀면전단력에 대한 최상층 변위를 나타낸다. 건물 높이의 최대 15%까지 해석을 수행하였으며 필로티 건물의 최대

밀면전단력은 약 1406.8kN, 최상층 변위는 약 166mm로 나타났다.

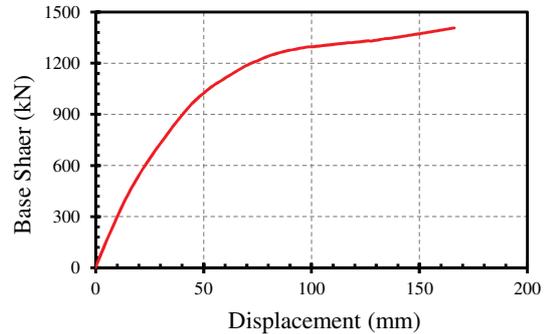


Fig. 16. Push-over analysis result

Fig. 17.에서 소성힌지의 위치 및 크기를 3단계로 분류하여 나타내었다. 1층 보 양단에서 0.02rad 이상의 소성힌지가 분포하였으며 1층 기둥 하부, 2층 기둥 상부에서 0.01~0.02rad의 소성힌지가 분포하는 것을 볼 수 있다. 보의 단면이 크게 설계 되는 필로티 건물의 특성상 약기둥-강보 구조로 1층 기둥 하단부에서 대부분의 소성힌지가 발생하는 것을 볼 수 있다.

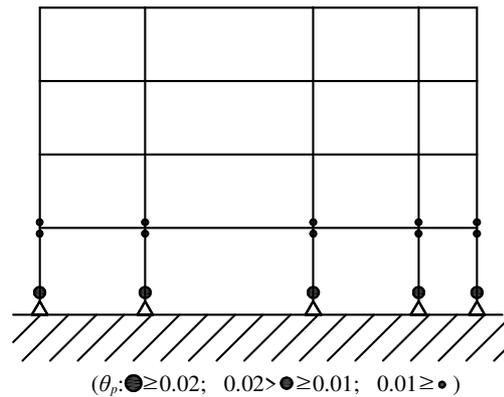


Fig. 17. Plastic hinge of Push over result

5.4 비선형 시간이력해석

5.4.1 층간변위응답

비선형 시간이력해석은 2장에서 분석한 경주지진, 포항지진과 Table 5의 국외 지진파를 이용하여 수행하였으며 100%로 가진하였다. Table 6은 필로티 건물의 OpenSees 해석 결과 층별 Drift Ratio를 정리한 것으로 음영은 층간변위 1.5%를 초과하는 값이다. Fig. 18.~22.는 국내의 지진파로 가진한 필로티 건물의 밀면전단력에 대한 최상층 변위 그래프이다.

Table 5. Response Characteristics of earthquakes

Station	Component	PGA (g)	EPGA (g)
El Centro	N-S	0.319	0.307
Northridge	N-S	0.843	0.799
Kobe	N-S	0.834	0.698

Table 6. Maximum drift ratio of OpenSees analysis result

Earthquake		Gyeongju	Pohang	El Centro	Kobe	Northridge
4th Story	Drift (%)	0.0863	0.3131	0.5493	2.3335	0.6940
3rd Story	Drift (%)	0.1069	0.4006	0.7094	3.0615	0.8992
2nd Story	Drift (%)	0.1430	0.5628	1.0128	4.4931	1.2918
1st Story	Drift (%)	0.1326	0.5589	1.0185	4.5043	1.3261

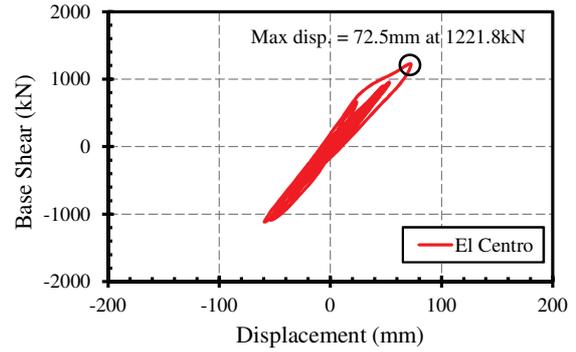


Fig. 20. Curve of El Cento earthquake

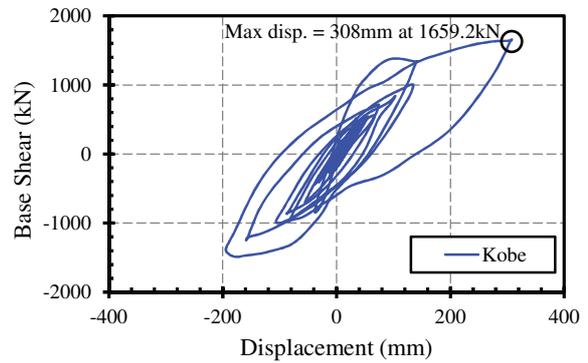


Fig. 21. Response curve of Kobe earthquake

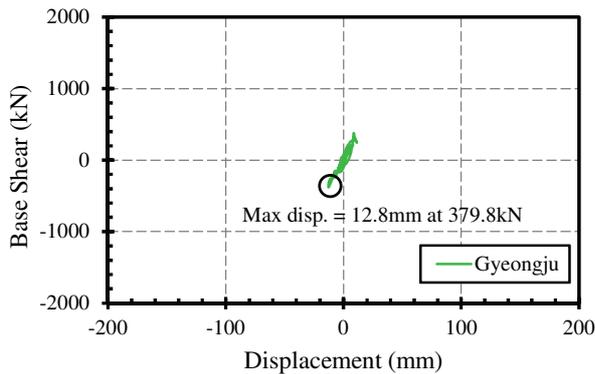


Fig. 18. Response curve of Gyeongju earthquake

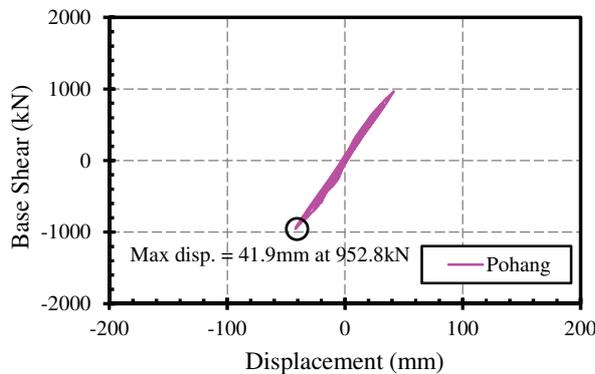


Fig. 19. Response curve of Pohang earthquake

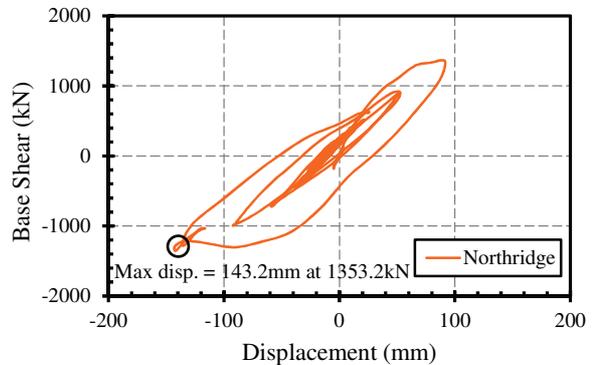


Fig. 22. Response curve of Northridge earthquake

5.4.2 모멘트-회전각

상대적으로 구조물에 미치는 영향이 작은 경주지진에서는 1층 보에만 소성힌지가 발생하였고 나머지 지진에서는 보, 기둥 상하부에 고루 분포하는 것을 볼 수 있다. 부재의 항복 상태를 알아보기 위하여 비교적 취약한 곳으로 판단된 1층 기둥 하부와 보를 대상으로 부재의 소성상태를 파악해보았다. Table 7은 1층 기둥 하부 절점에서 나타나는 최대 회전각을 정리한 것이다. 음영은 1층의 5개

의 절점 중 최대 회전각을 의미한다. Fig. 23.은 기둥의 모멘트 - 회전각 그래프이다. Kobe 지진의 경우 기둥 하부에서 0.02 rad 이 넘는 회전각이 나타났다.

Table 7. Rotation of 1st story column

Earthquake	Maximum rotation (rad)				
	node 1001	node 1002	node 1003	node 1004	node 1005
Pohang	0.0018	-0.0018	0.0018	0.0021	-0.0029
El Centro	0.0053	0.0050	0.0055	0.0058	0.0053
Kobe	0.0374	0.0382	0.0384	0.0384	0.0386
Northridge	-0.0137	-0.0149	-0.0145	-0.0151	-0.0165

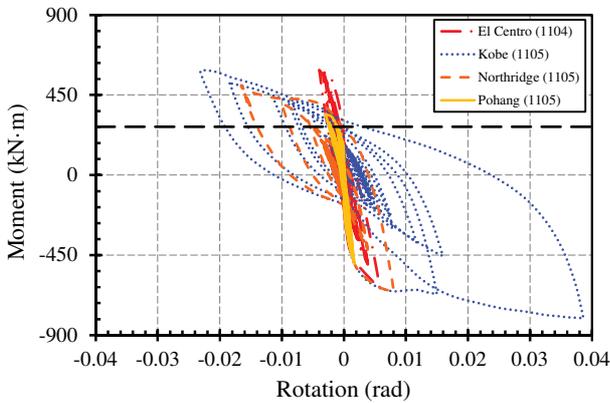


Fig. 23. Moment - Rotation of column

Table 8은 보 양단 절점에서 나타나는 최대 회전각을 정리한 것이며 Fig. 24.는 보의 모멘트 - 회전각 그래프이다. 대부분 Element 2202에서 최대 회전각이 발생하였다.

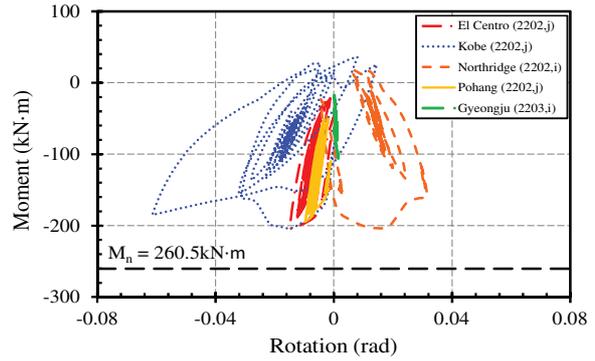


Fig. 24. Moment - Rotation of Beam

5.4.3 기둥 전단력

필로티 건물에서 가장 취약한 1층 기둥에 대하여 전단력에 대한 전단변형률을 파악해보았다. (Park & Paulay, 1975) Fig. 25.는 각 지진파에 대한 기둥 1개의 전단력-전단변형률 그래프이다. ACI 318의 전단강도 산정식에 따라 기둥의 전단강도(V_n)를 247.1kN으로 계산하였으며 스트립에 의한 철근의 전단강도(V_s)는 91.3kN으로 산정되었다. 2D 모델링의 한계점인 축력으로 인한 콘크리트 강도 저하를 추가적으로 고려하면 1층 기둥에 심각한 손상이 있을 것으로 판단된다.

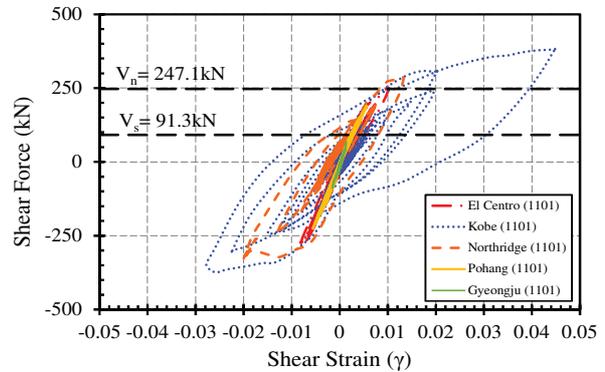


Fig. 25. Shear force - Shear strain of column

Table 8. Rotation of Beam

Earthquake	Maximum rotation (rad)							
	Element 2201		Element 2202		Element 2203		Element 2204	
	End-i	End-j	End-i	End-j	End-i	End-j	End-i	End-j
Gyeongju	0.0014	-0.0013	0.0042	-0.0039	0.0015	-0.0011	0.0007	-0.0006
Pohang	0.0058	-0.0058	0.0095	-0.0096	0.0058	-0.0054	0.0038	-0.0042
El Centro	0.0086	-0.0101	0.0127	-0.0150	0.0083	-0.0095	-0.0072	-0.0103
Kobe	-0.0417	-0.0528	0.0417	-0.0614	-0.0405	-0.0528	-0.0470	-0.0483
Northridge	0.0251	-0.0136	0.0317	-0.0182	0.0243	0.0132	0.0216	0.0196

6. 강제슬릿댐퍼를 이용한 필로티 보강

6.1 필로티 건물 내진보강 개요

Fig. 26.은 필로티 건물의 내진보강 위치 및 모델링을 나타낸다. 필로티 건물의 2층 이상은 주거용이므로 1층에 강제 슬릿 댐퍼를 설치하는 것으로 가정하여 모델링하였다. (Yoo *et al.*, 2016) 강제슬릿댐퍼의 상세는 앞서 해석한 실험체와 같다.

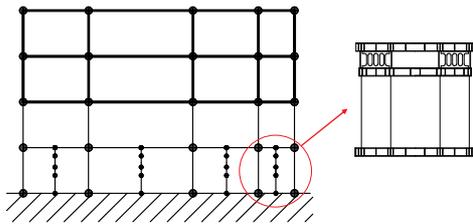


Fig. 26. Modeling of seismic reinforcement

6.2 비선형 정적해석

Fig. 27.은 대상건물의 내진보강 전후 Push over 해석 결과 밀면전단력에 대한 최상층 변위 결과이다. 최대 밀면전단력은 보강 전 1404.6kN에서 1801kN 으로 약 1.3배 증가하였고 강성은 약 1.55배 증가하였다.

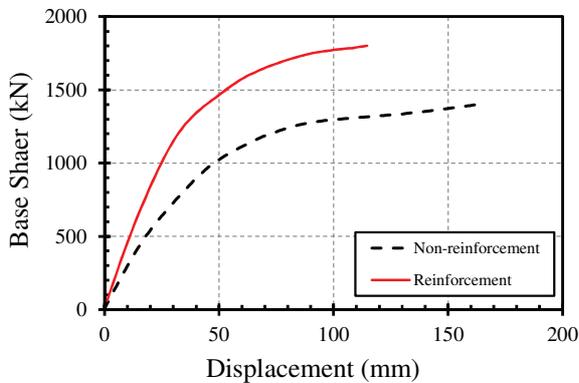


Fig. 27. Pushover analysis result after reinforcement

6.3 비선형 시간이력해석

6.3.1 층간변위응답

1층 층간변위가 0.5%이하로 나타난 경주지진을 제외한 포항, El Centro, Kobe, Northridge 4개 지진파에 대하여 재해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 28.과 같이 모든 지진파에서 보강 후 50%이상의 층간변위 감소 효과를 보였으며 Kobe지진을 제외한 나머지 세 지진파에 대해서는 KBC2016 에 제시된 내진 I 등급 건

물의 허용 층간 변위비인 1.5%를 초과하지 않아 적절한 보강이 이루어진 것으로 판단된다.

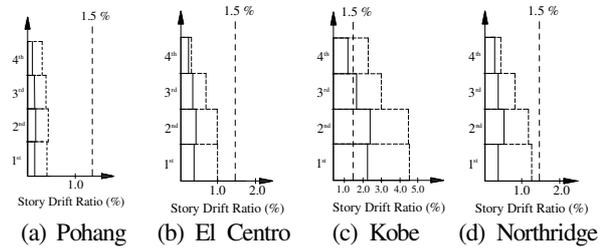


Fig. 28. Drift ratio after steel slit damper reinforcement

6.3.2 모멘트-회전각

Table 9는 1층 기둥 하부 최대 회전각을 정리한 것으로 음영은 최댓값을 의미한다. Kobe 지진을 제외한 나머지 세 지진에서는 0.02rad 이상의 큰 소성힌지는 발생하지 않았다. 강제 슬릿 댐퍼로 보강 후 0.02rad 이상의 회전각은 발생하지 않았으며 보강 전과 비교했을 때 약 37% ~ 59%의 감소효과를 보였다.

Table 9. Rotation of 1st story column after reinforcement

Earthquake	Maximum Rotation (rad)				
	node 1001	node 1002	node 1003	node 1004	node 1005
Pohang	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
El Centro	0.0009	-0.0013	-0.0010	-0.0013	-0.0024
Kobe	0.0173	0.0176	0.0176	0.0177	0.0175
Northridge	-0.0069	-0.0084	-0.0079	-0.0085	-0.0104

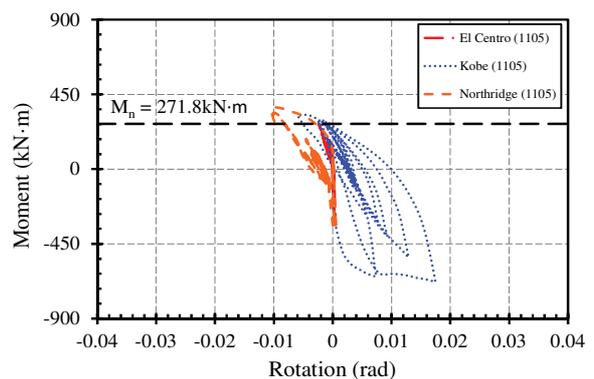


Fig. 29. Moment - Rotation of column

Table 10은 보강 후 필로티 보 양단의 최대 회전각을 정리한 것

Table 10. Rotation of Beam after reinforcement

Earthquake	Maximum Rotation (rad)							
	Element 2201		Element 2202		Element 2203		Element 2204	
	End-i	End-j	End-i	End-j	End-i	End-j	End-i	End-j
Gyeongju					0.0015	-0.0011	0.0007	-0.0006
Pohang	-0.0007	-0.0006	0.0005	-0.0007	0.0058	-0.0054	0.0038	-0.0042
El Centro	0.0041	0.0037	0.0034	0.0028	0.0083	-0.0095	-0.0072	-0.0103
Kobe	-0.0243	-0.0263	-0.0187	-0.0247	-0.0405	-0.0528	-0.0470	-0.0483
Northridge	0.30153	0.0119	0.0117	0.0101	0.0243	0.0132	0.0216	0.0196

으로 음영은 최댓값을 의미하며 모두 Element 2204에서 최대 회전각이 요구되었으며 매우 작은 값으로 전반적으로 소성회전각이 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. Kobe 지진의 경우 1층 보에서 0.02rad 이상의 회전각이 발생하였으나 보강 전과 비교했을 때 약 57% 감소하였다.

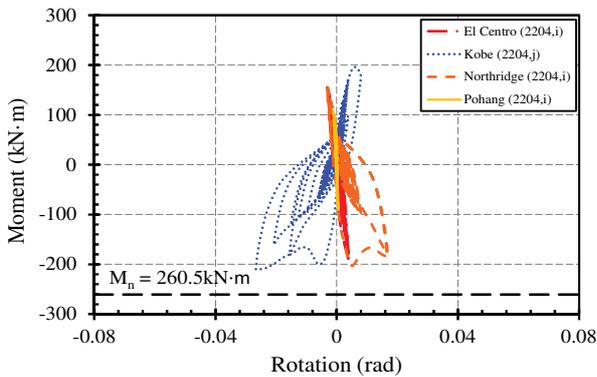


Fig. 30. Moment - Rotation of Beam

6.3.3 기둥 전단력

Table 11과 Fig. 31.은 강재 슬릿 댐퍼 보강 후 필로티 건물의 기둥 전단력을 나타낸 것이다. 모든 지진파에서 이론적으로 계산한 콘크리트 전단강도 (V_n) 247.1kN을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 전단변형률의 경우 포항지진에서 약 70% 감소로 가장 큰 감소를 보였고 그 외의 지진에서도 약 30%~50%의 변형률 감소 효과가 있었다.

Table 11. Shear force of column after reinforcement

Column (1001)	Gyeongju	Pohang	El Centro	Kobe	Northridge
Shear Force (kN)	46.4	42.0	109.9	218.9	249.3
ShearStrain	0.0017	0.0017	0.0046	0.0237	0.0139

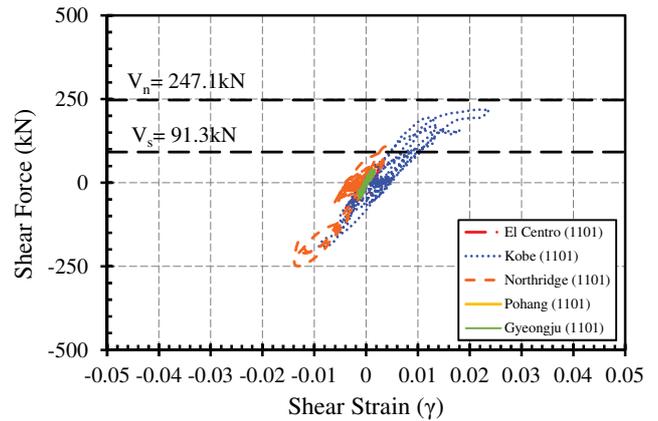


Fig. 31. Shear force - Shear strain of column

6.4 정리

본 연구에서는 필로티 건물을 대상으로 국내의 지진파에 대한 비선형 동적해석을 수행하였다. 층간변위, 부재의 소성회전각, 전단변형률을 토대로 구조물 전체 및 부재단위의 구조물의 내진성능을 평가하였다. 이후 강재슬릿댐퍼를 이용한 1층 내진보강을 수행하였으며 Table 12에서 보강 전후 필로티 건물의 응답특성을 정리하였다. 보강 후 최상층 층간변위는 모든 지진파에서 1.5% 이내로 포항지진 기준 약 41%의 보강효과가 나타났다. 취약하다고 판단되었던 1층 보의 양단에서도 Kobe 지진을 제외한 모든 지진파에서 0.02rad 이하의 소성회전각이 나타났으며 1층 기둥의 전단 변형률도 약 30% 감소효과를 보였다. 따라서 적절한 내진보강이 이루어진 것으로 판단된다.

Table 12. Response characteristics of buildings before and after reinforcement

Earthquake	Roof Drift (%)		Column (1101) Shear Strain	
	Non-reinforcement	Reinforcement	Non-reinforcement	Reinforcement
Gyeongju	0.08	-	0.0016	-
Pohang	0.31	0.13	0.0056	0.0017
El Centro	0.55	0.27	0.0102	0.0046
Kobe	2.33	1.36	0.0450	0.0237
Northridge	0.69	0.29	0.0203	0.0139

7. 결론

1) 국내지진파의 응답스펙트럼 작성 결과, KBC2016의 설계응답스펙트럼을 크게 초과하였으며 1층~5층 정도의 저층 구조물에 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

2) 선행 연구된 강제 슬릿 댐퍼의 동적 실험 결과를 바탕으로 OpenSees를 이용한 전산해석을 수행하였다. Push over 해석 및 비선형 시간이력해석 결과, 실험 결과와 역량곡선이 유사함에 따라 해석 모델의 신뢰성을 입증했다.

3) 필로티 건물의 내진성능을 평가하기 위하여 OpenSees를 이용한 해석 결과 1층 보 양단에서 0.02rad 이상의 소성힌지가 발생하였으며 기둥에도 0.01~0.02rad의 소성힌지가 발생하므로 Sway 파괴가 함께 일어날 것으로 추정할 수 있다.

4) 필로티 저층부의 심각한 손상이 예상됨에 따라 강재슬릿댐퍼를 이용하여 필로티 건물의 내진보강을 실시하였다. Push over 해석 결과 보, 기둥 양단의 최대 회전각이 0.01rad 이하로 줄어들었으며 비선형 시간이력 해석 결과 50%이상의 층간변위 감소 효과를 보였다.

5) 보강 후 비선형 시간이력해석 결과, 모든 기둥에 0.02rad 이상의 회전각은 발생하지 않았으며 보강 전과 비교했을 때 회전각의 크기가 약 57% 감소하였다. 또한 기둥의 전단파괴가 발생하지 않는다는 결과를 얻었으며 적절한 내진보강이 이루어진 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2017R1A2B3009984).

참고문헌(References)

- [1] 기상청(2017) 지진 통보문, <http://www.kma.go.kr>. Korea Meteorological Administration (2017) *Earthquake Notice*, <http://www.kma.go.kr> (in Korean).
- [2] 이철호, 박지훈, 김태진, 김성용, 김동관(2016) 2016년 9월 12일 M5.8 경주 지진의 데미지 포텐셜 분석 및 내진공학 측면의 시사점, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제20호, 제7호, pp.527-536.
Lee, C.H., Park, J.-H., Kim, T.J., Kim, S.-Y., and Kim, D.-K. (2016) Damage Potential Analysis and Earthquake Engineering-Related Implications of Sep. 12, 2016 M5.8 Gyeongju Earthquake, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.20, No.7, pp.527-536 (in Korean).
- [3] 신경재, 이수현, 이희두, 권학섭(2016) 철근콘크리트 골조의 진동대 실험을 통한 원형개구부를 갖는 강판전단벽의 내진 보강 효과, 대한건축학회연합논문집, 대한건축학회지회연합회, 제18권, 제2호, pp.107-114.
Shin, K.J., Lee, S.-H., Lee, H.-D., and Kwon, H.-S. (2016) Seismic-Strengthening Effect of Steel Shear Wall with Circular Opening through Shaking Table Test on Reinforced Concrete Frame, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, The Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol.18, No.2, pp.107-114 (in Korean).
- [4] 고동우, 이한선(2009) 필로티형 고층 RC 건물의 비선형시간이력해석, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제13권, 제1호, pp.35-43.
Go, D.-W., and Lee, H.-S. (2009) Non-Linear Time History Analysis of Piloti-Type High-Rise RC Buildings, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.13, No.1, pp.35-43 (in Korean).
- [5] 이용규, 고동우(2013) 일방향 정적해석을 통한 필로티형 RC 건물의 지진거동 연구, 대한건축학회연합논문집, 대한건축학회지회연합회, 제15권, 제5호, pp.181-188.
Yi, Y.-G., and Ko, D.-W. (2013) Study on the Seismic Be-

- havior of Piloti-Type RC Buildings Using Push-over Analysis, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, The Regional Association of Architectural Institute of Korea, Vol.15, No.5, pp.181-188 (in Korean).
- [6] 신경재, 여운서, 이수현(2012) 응답특성이 다른 지진파에 대한 RC 모멘트골조의 내진성능평가, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제28권, 제4호, pp.47-54.
Shin, K.-J., Yeo, U.-S., and Lee, S.-H. (2012) Seismic-Resistance Performance Evaluation of RC Moment Frame for Seismic Waves with Different Response Characteristics, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.28, No.4, pp.47-54 (in Korean).
- [7] 유창환, 김태완, 추유림(2016) 비선형 동적해석을 이용한 소규모 필로티형 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제20권, 제4호, pp.191-199.
Yoo, C., Kim, T., and Chu, Y. (2016) Seismic Performance Evaluation of Small-Size Piloti-Type Reinforced Concrete Buildings Using Nonlinear Dynamic Analysis, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 20, No.4, pp.191-199 (in Korean).
- [8] Fajfar, P. (2000) A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol.16, No.3, pp. 573-592.
- [9] Pacific Earthquake Engineering Research Center (2009) *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [10] Chopra, A.K. (2012) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4th Ed.), Prentice Hall, USA.
- [11] Park, R., and Paulay, T. (1975) *Reinforced Concrete Structures*, Wiley, USA.

요 약 : 2017년 11월 15일 경북 포항시에서 규모 5.4의 국내에서 두 번째로 강한 지진이 발생하였으며 강진 지속시간은 약 4초~6초로 짧았으나 그 피해의 규모는 9.12 경주지진과는 비교할 수 없을 만큼 심각했다. 본 연구에서는 선행 연구에서 수행한 진동대 실험 결과를 바탕으로 OpenSees를 이용하여 실험체를 모델링하여 비선형 정적해석 및 시간이력해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 강재 슬릿 댐퍼 모델링의 신뢰성을 입증하였다. 그 후 포항시에 위치한 주거용 필로티 건축물을 대상으로 국내외 지진에 대한 비선형 해석을 통해 내진성능평가를 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 취약부위를 파악하고 강재 슬릿 댐퍼를 이용한 내진보강을 실시한 것으로 가정하여 대상건물의 내진성능을 재평가 하였다.

핵심용어 : 필로티건축물, 강재슬릿댐퍼, OpenSees, 비선형해석, 시간이력해석, 내진설계
