

공동 주택의 구조벽과 비내력벽의 일체화 효과에 따른 내진 성능 분석

Seismic Evaluation of an Apartment House With a Coupling Effect of Structural and Non-Structural Walls

김은서*
Kim, Eun-Seo

최병훈*
Choi, Byung-Hoon

이정환**
Lee, Jung-Han

이기학***
Lee, Kihak

Abstract

This study was carried out to examine the effect of the presence of non-structural walls in apartment buildings subjected to an earthquake. It was believed that the presence of non-structural walls, which has not been considered in the structural design process, was usually built together with structural walls and this led to significant damages to the apartment buildings in Pohang earthquake, 2017. In this study, a 22-story apartment building was selected and modeled to simulate the seismic behavior due to earthquakes. The story drift, performance point, and compressive strain in the walls were the main parameters to evaluate the seismic performance with the presence of non-structural walls.

Keywords : Seismic performance evaluation, Apartment buildings, Structural and non-structural wall

1. 서론

최근 발생한 포항 지진으로 인해 국내 지진 계측 사상 가장 큰 인명 및 구조물 피해가 발생하였다. 특히 많은 가구가 거주하고 있는 아파트에서 피해가 다수 발생하였다. 일부 건축물에서는 북쪽으로 약 3도 기울어지는 구조물의 전도가 발생하였으며 벽체 이격, 접합부 파괴, 비내력벽의 전단 균열이 발생함에 따라 사람들이 더 이상 거주하지 못할 만큼의 피해가 발생하였다. 거주가 불가능할 정도는 아니지만 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽의 피해가 발생한 공동 주택도 추가적으로 6곳 발견되었다. 전단벽 균열로 인한 구조적인 피해보다는 비내력벽의 피해가 대부분으로 인명 피해가 발생하지는 않았지만 높은 비구조 요소의 보수 비용이 발생하였

으며, 거주민의 심리적 불안감을 초래하였다¹⁾.

수벽 및 날개벽은 비내력벽으로서 횡력 저항 부재로 고려하지 않고 구조 해석을 수행하고 있다. 그러나 시공 현장에서는 비내력벽의 경우 수벽 및 날개벽에 최소 철근으로 배근하여 전단벽과 일체화시켜 동일하게 콘크리트 타설을 진행한다. 수벽과 날개벽 등 비내력벽이 설계 시 의도한 바와는 다르게 일정 정도 이상의 강성을 가지게 되고 지진 하중 발생 시 내력을 분담하여 예상하지 못한 큰 균열 손상과 부재의 취성 파괴를 유발하게 된다. 이로 인해 비교적 최신 건축물로 내진 설계가 이루어진 <Fig. 1>의 35층 S아파트에서 많은 동이 2017년 포항 지진 발생 시 비내력벽과 수벽에 심각한 균열과 손상을 입게 되었다²⁾.

본 논문은 국내의 전형적인 아파트 평면을 갖는 22층의 공동 주택 건축물을 선정하여 비내력벽 유무에 따른 내진 성능을 분석하고 구조벽과 비내력벽의 일체화(Coupling) 효과에 대해 연구하고자 한다.

* 학생회원, 세종대학교 건축공학과, 석사과정
College of Architecture, Sejong University

** 정회원, 국립재난안전연구원 시설연구관, 공학박사
National Disaster Management Research Institute

*** 교신저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
College of Architecture, Sejong University
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-4331
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

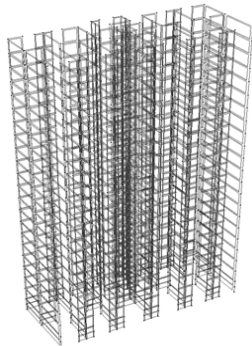


〈Fig. 1〉 Pohang S apartment damage after earthquake

2. 해석 모델

2.1 비내력벽이 없는 건축물(W/O NBW)

해석 모델은 비선형 해석 프로그램인 Perform-3D 프로그램을 이용하여 비내력벽 유무에 따라 모델링되었다. 비내력벽이 없는 건축물은 (W/O Non Bearing Wall 이하 W/O NBW) 전단벽과 연결보로 구성된 22층 공동 주택 건축물이다. 연결보, 보 및 전단벽에 대한 물성치는 FEMA의 이력 곡선 값을 통한 요소 모델링을 하였다.



〈Fig. 2〉 W/O NBW modeling

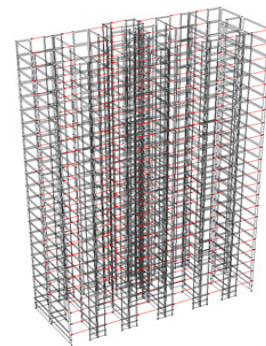
〈Table 1〉 Overview of the building parameters

Building floor	22 floor
Load	DL = 5.62kN/m ²
	DLroof = 5.20kN/m ²
	LL = 2.00kN/m ²
Strength of materials	fy = 440MPa
	fce = 26.4MPa
Slab thickness	200mm
Wall thickness	200mm
Coupling beam size	200 X 600, 200 X 750

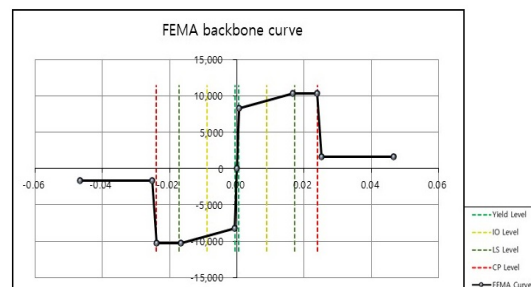
2.2 비내력벽이 있는 건축물(W/ NBW)

Perform-3D 프로그램을 이용하여 비내력벽이 있는 해석 모델(W/ Non Bearing Wall 이하 W/ NBW)을 구현하였다. 〈Fig. 3〉의 붉은색 부분이 연결보로 모델링된 비내력벽이다.

Perform-3D에서는 벽체를 모사할 수 있는 2가지 방법이 있다. Shear wall은 면내 방향 수평 축-휨 거동을 탄성으로만 적용할 수 있으며, 대각 압축 거동의 옵션이 없다. 반면 General wall은 수직 및 수평 축-휨 거동 모두 Inelastic fiber section을 이용하여 비탄성 거동을 적용할 수 있으며, 대각 압축 거동도 모사할 수 있는 옵션이 있다³⁾. 해당 건축물은 General wall로 비내력벽 모델링을 고려하였고 이를 연결보로 대체하여 모델링하였다. 연결보의 물성치는 FEMA의 이력 곡선 값을 통한 요소 모델링하였다. FEMA의 이력 곡선은 비선형 정적 및 동적 해석을 위한 구성 요소 모델을 개발하기 위한 기초로 지진 설계 표준에 사용된다⁴⁾. FEMA 이력 곡선은 〈Fig. 4〉에 나타나 있다.



〈Fig. 3〉 W/ NBW modeling



〈Fig. 4〉 FEMA backbone curve

3. 내진 성능 평가 및 해석 절차

3.1 비선형 정적 해석

비선형 정적 해석은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계 상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 일반적인 해석 방법이다⁵⁾. 비선형 정적 해석에 의한 공동 주택 성능 수준은 최대 층간 변위비와 부재별 및 전체 구조물의 성능 수준에 의해 판별되며 성능점에서 판정된다. 성능점을 산정하기 위해서는 역량 스펙트럼법(Capacity spectrum method)과 변위계수법(Displacement coefficient method)을 사용한다. 본 연구에서는 역량 스펙트럼법을 사용하였다⁶⁾.

역량 스펙트럼법은 비선형 정적 해석으로 얻을 수 있는 대상 구조물 전체의 밀면 전단력-최상층 변위 역량 곡선(Capacity curve)과 구조물의 고려하는 지진에 대한 요구를 응답 스펙트럼으로 나타낸다. 이 두 그래프를 동일한 그래프 상에서 표현함으로써 요구와 역량의 상호 관계를 동시에 나타낼 수 있다. 여기서 설계 지진에 대한 요구 응답 스펙트럼은 5% 감쇠비를 고려하였다⁷⁾.

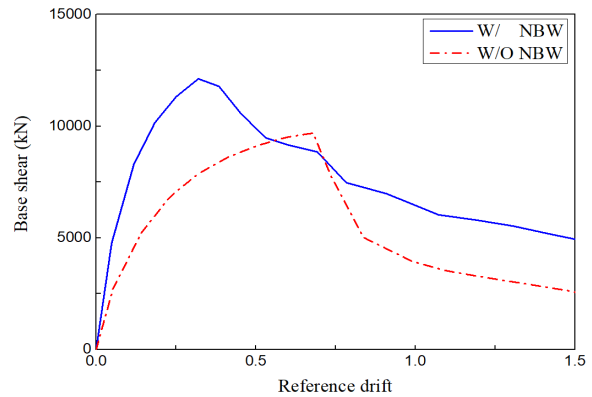
3.1.1 Pushover curve

비내력벽 유무에 따른 Pushover curve를 검토하였다. 밀면 전단력을 비교한 결과, X방향의 W/NBW Model은 25.1% 증가하였고, Y방향의 W/NBW Model은 28.7% 증가하였다.

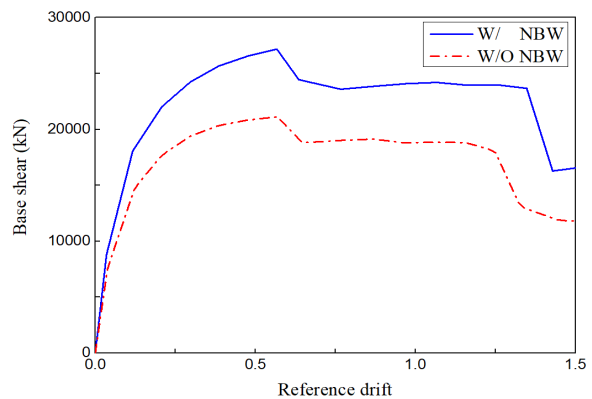
비내력벽이 없는 구조물과 다르게 비내력벽을 포함한 구조물은 기존 구조벽을 일체화하는 효과가 발생하고 이를 통해 공동 주택의 강성 및 강도가 증가하였다.

〈Table 2〉 Base shear comparison between W/ and W/O NBW cases

	W/O NBW	W/ NBW	Ratio (%)
X-Dir.	9,688.28	12,121.31	25.1
Y-Dir.	21,120.3	27,172.84	28.7



〈Fig. 5〉 X-direction pushover curve



〈Fig. 6〉 Y-direction pushover curve

3.1.2 성능점

비내력벽 유무에 따른 건축물의 X방향과 Y방향으로 비선형 정적 해석을 실시한 결과, 두 방향에서 성능점이 형성되었다. 〈Table 3〉, 〈Table 4〉에 W/NBW, W/O NBW 각 성능점의 밀면 전단력과 지붕 변형률을 나타내었다.

〈Table 3〉 W/O NBW X, Y-direction performance point

	Base shear (kN)	Reference drift
X-Dir.	9,578	0.00649
Y-Dir.	22,000	0.00223

〈Table 4〉 W/ NBW X, Y-direction performance point

	Base shear (kN)	Reference drift
X-Dir.	11,280	0.00249
Y-Dir.	18,150	0.00236

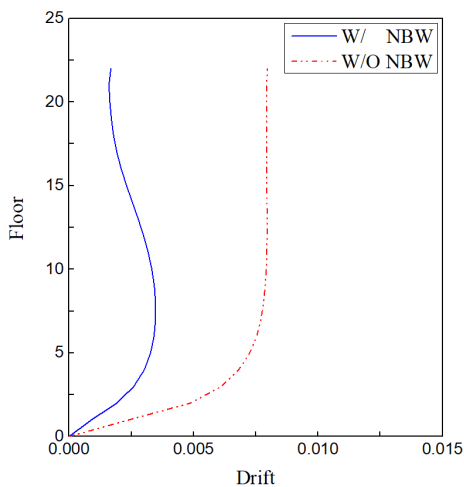
3.1.3 층간 변위비

최종 산정된 성능점에서의 최대 허용 층간 변위비가 범위 내에 존재하는지 여부를 검증하였다. 목표 성능 수준은 내진 I 등급을 고려하여 해당 최대 허용 층간 변위비가 0.015를 초과하지 않아야 한다⁹⁾. 성능점에서 층간 변위비를 검토한 결과, 목표 성능을 만족하는 것으로 나타났다. <Fig 7>에 X방향의 최대 층간 변위비를 나타내었다.

비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향 W/ NBW Model의 층간 변위비가 56.4% 감소하였고, Y방향 W/ NBW Model의 층간 변위비가 75.4% 감소하였다. 비내력벽의 존재로 구조벽이 일체화되고, 강성과 강도의 증가로 전체 구조물의 층간 변위비가 감소하였다.

<Table 5> X, Y-direction story drift

	W/O NBW	W/ NBW	Ratio (%)
X-Dir.	0.007969	0.003475	56.4
Y-Dir.	0.00103	0.00025341	75.4



<Fig. 7> X-Direction story drift comparison

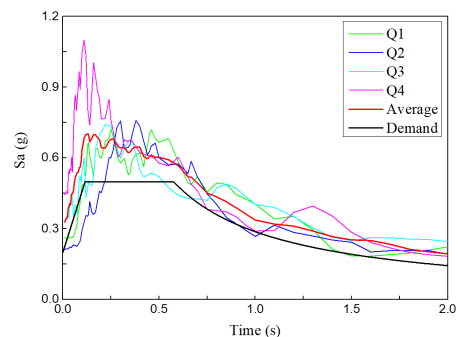
3.2 비선형 동적 해석

Pushover 해석으로 알려진 비선형 정적 해석은 탄성 설계만 실시하는 하중 기반 설계법에 비해 구조물의 비선형 거동을 고려함으로써 지진 하중이 작용할 때 실제 구조물의 거동을 더 명확하게 평가할 수 있다. 그러나 정적 해석에 기반을 두고 있기 때문에 비선형 동적 해석 결과보다 부정확하다고 할 수 있다. 따라서 고층 또는 비정형 건축물의 경

우 정확한 동적 거동을 파악하기 위해 비선형 동적 해석을 실시하여야 한다⁹⁾. 비선형 동적 해석은 재료 및 부재의 비선형 특성과 시간 의존적인 특성을 반영하여 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답 이력을 구할 수 있는 가장 정확한 해석 방법이다. 일반적으로 직접 적분법(Direct integration method)의 수치 적분법을 통해서 시간의 증분에 따른 구조물의 변위 증분을 반복적인 계산으로 산정한다¹⁰⁾.

3.2.1 적용 지진 이력

시간 이력 해석은 지반 조건에 상응하는 지반 운동 기록을 최소 3개 이상 사용하여 실시해야 한다. KBC2016의 0306.7.4.에 따라 개별 지반 운동의 성분별로 5% 감쇠비의 응답 스펙트럼을 작성한다. 주기별로 제곱합 제곱근(SRSS)을 취하여 제곱합 제곱근 스펙트럼을 산정하며, 스펙트럼의 평균값이 설계 대상 구조물 기본 진동 주기의 0.2~1.5배 사이 ($0.2T_1 < T < 1.5T_1$)에 해당되는 주기에 대해서 설계 스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 해야 한다. 3개의 지반 운동을 이용하여 해석할 경우 최대 응답을 사용해야 하며, 7개 이상의 지반 운동을 이용하여 해석할 경우 평균 응답을 사용할 수 있다¹¹⁾. 본 연구에서는 4개의 지반 운동을 사용하였다. <Fig. 8>과 같이 총 4개의 지반 운동을 KDS의 스펙트럼에 맞게 Second Match 컴퓨터 응용 프로그램을 사용하여 스케일링 후 비선형 동적 해석을 실시하였다. 스케일링 방법을 통한 4개 지반 운동은 <Table 6>에 나타나 있으며, 해석에 사용된 지진 하중 조건은 <Table 7>에 나타나 있다.



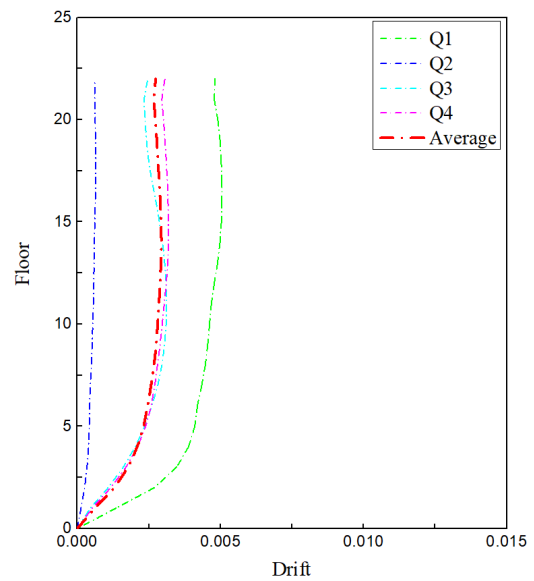
<Fig. 8> KDS design spectrum scaling for 7 earthquake records

<Table 6> Earthquake records for nonlinear analysis

Earthquake	Year	Station	Record time (sec)	Magnitude (Mw)	Scale factor
EQ 1. Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	53.7	6.95	0.563
EQ 2. San Fernando	1971	LB - Terminal Island	79.99	6.61	3.956
EQ 3. Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	39.09	6.53	0.418
EQ 4. Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	37.77	6.53	0.436

<Table 7> Seismic design parameters

Parameter	Value
Zone factor	0.22g
Importance factor	1.2
Site class	S_D
Site coefficient	$F_a=1.36$
	$F_v=1.96$
Spectrum acceleration	$S_{DS}=0.4987$
	$S_{D1}=0.2875$
Seismic category	D
Response modification coefficient	4
Seismic force-resisting system	Ordinary shear wall

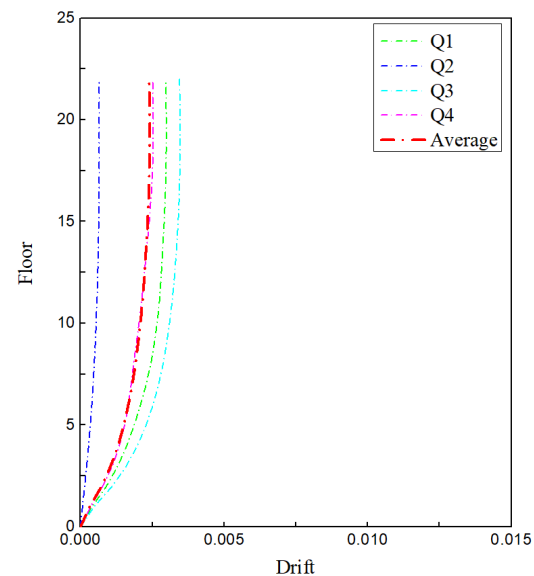


<Fig. 9> W/ NBW X-direction maximum inter-story drift

3.2.2 층간 변위비

4개의 지반 운동에 대한 최대값을 사용하여 대상 건축물의 X방향과 Y방향의 층간 변위를 검토하였다. W/O NBW X방향으로는 22층에서 최대 변위비 0.012 (Q4)으로 나타났고, Y방향으로는 20층에서 최대 변위비 0.004 (Q1)으로 나타났다. W/ NBW X방향으로는 16층에서 최대 변위비 0.005 (Q1)으로 나타났고, Y방향으로는 19층에서 최대 변위비 0.0035 (Q3)으로 나타났다. W/ NBW 및 W/O NBW의 최대 변위비 모두 허용 층간 변위비인 0.015를 초과하지 않아 목표 성능을 만족하는 것으로 판단되었다.

비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, 비내력벽이 X방향으로 포함되어 X방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 58.3% 감소하였다. Y방향의 W/ NBW Model의 층간 변위비가 12.5% 감소하였다. <Fig. 9~12>와 <Table 8>은 X방향과 Y방향 4개 지반 운동에 대한 최대 층간 변위비와 그에 대한 평균값, 허용 층간 변위비를 나타내고 있다.



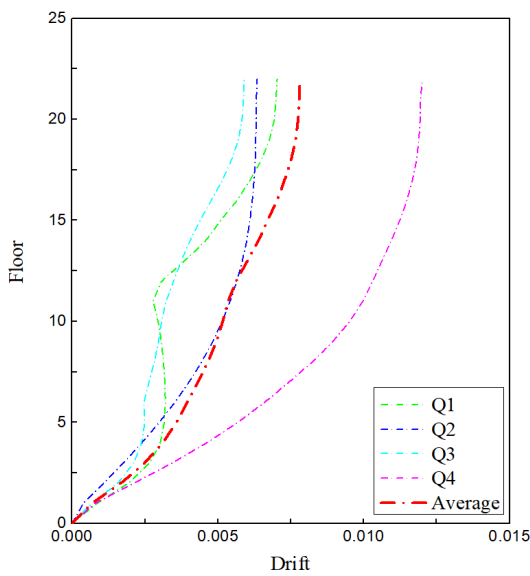
<Fig. 10> W/ NBW Y-direction maximum inter-story drift

〈Table 8〉 W/ NBW X, Y-direction maximum inter-story drift

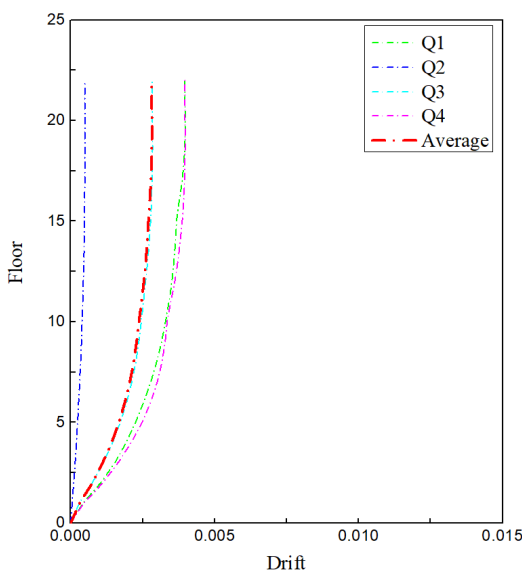
	X-Dir. Max.	Y-Dir. Max.
Q1	0.005	0.003
Q2	0.0006	0.0007
Q3	0.0031	0.0035
Q4	0.0032	0.0025
Average	0.0029	0.0024

〈Table 9〉 W/O NBW X, Y-direction maximum inter-story drift

	X-Dir. Max.	Y-Dir. Max.
Q1	0.007	0.004
Q2	0.0063	0.0005
Q3	0.0059	0.0028
Q4	0.012	0.004
Average	0.0078	0.0028



〈Fig. 11〉 W/O NBW X-direction maximum inter-story drift



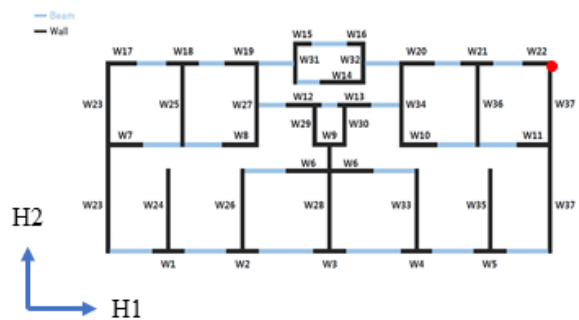
〈Fig. 12〉 W/O NBW Y-direction maximum inter-story drift

3.2.3 압축 변형률

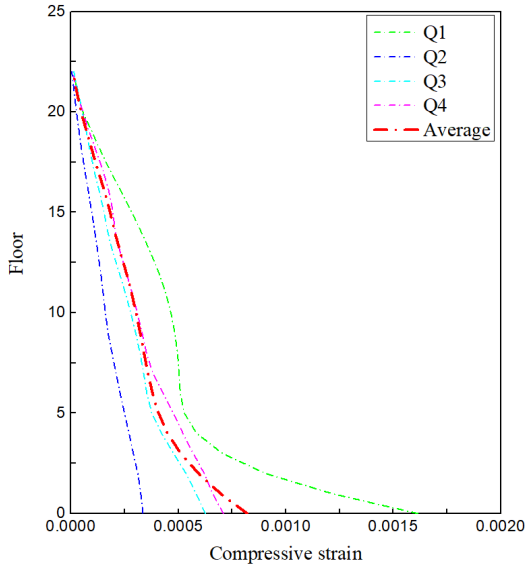
RC 전단벽으로 대표되는 공동 주택은 층간 변위 비와 함께 벽체의 압축 변형률이 내진 성능에 중요한 영향을 미친다. 벽체 단부의 수직 방향 변형률 응답이 가장 클 것으로 예상되는 최외각에 위치한 벽체에서 압축 변형률 검토를 수행하였다. 해당 벽체는 <Fig. 13>에 붉은색 점으로 표시되어있다.

벽체의 압축 변형률에 대한 검토는 중요한 사항으로 ASCE 41-06에 따라 콘크리트 허용 압축 변형률을 0.002로 설정하였다¹²⁾.

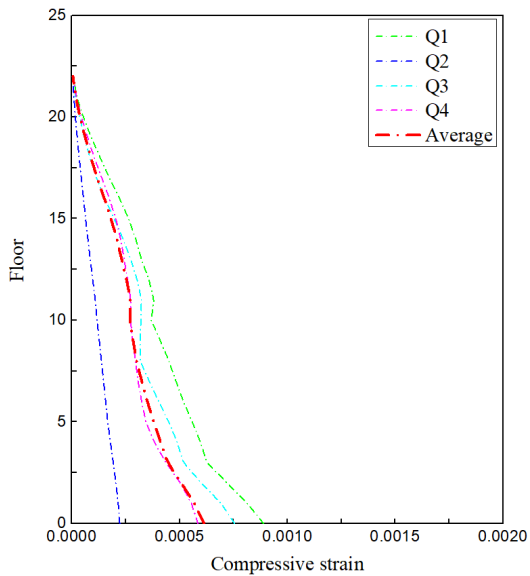
W/O NBW에 대해서 4개 지진과 중 최대값은 0.0009 (Q1)으로 나타났고, W/ NBW에 대해서 4개 지진과 중 최대값은 0.0016 (Q1)으로 허용 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.



〈Fig. 13〉 Compressive strain measured at the upper right corner wall



〈Fig. 14〉 W/ NBW element compressive strain



〈Fig. 15〉 W/O NBW element compressive strain

〈Table 10〉 Compressive strain comparison

	W/ NBW Max.	W/O NBW Max.
Q1	0.0016	0.0009
Q2	0.0003	0.0002
Q3	0.0006	0.0008
Q4	0.0007	0.0006
Average	0.0008	0.0006

4. 결론

본 논문에서는 국내의 전형적인 아파트 평면을 갖는 22층의 공동 주택 건축물을 선정하여 비내력 벽 유무에 따른 비선형 정적 해석과 비선형 동적 해석을 실시하였다. 이를 통해 구조물의 지진 거동을 더욱 명확히 예측하고 내진 성능을 평가하여 구조 벽과 비내력벽의 일체화 효과에 대해 연구하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

4.1. 비선형 정적 해석 결과

본 연구에서 적용된 22층의 공동 주택 해석 모델을 검증하기 위하여 비선형 정적 해석을 실시하였다.

1) Pushover curve를 통하여 밀면 전단력을 비교한 결과, X방향의 W/ NBW Model은 25.1% 증가하였고, Y방향의 W/ NBW Model은 28.7% 증가하였다.

2) 성능점 검토 결과, X방향과 Y방향의 성능점에서 밀면 전단력은 각각 17,780kN, 23,650kN이며 변위는 각각 1.638mm과 1.327mm로 확인되었다.

3) 비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향 W/ NBW Model의 층간 변위비가 56.4% 감소하였고, Y방향 W/ NBW Model의 층간 변위비가 75.4% 감소하였다.

4.2 비선형 동적 해석 결과

지반 조건을 고려하여 KDS 스펙트럼에 맞게 스케일링된 4개의 지반 운동을 적용하여 비선형 동적 해석을 실시하였다.

1) 비내력벽 유무에 따른 최대 층간 변위비를 계산한 결과, X방향 W/ NBW Model의 층간 변위비가 58.3% 감소하였다. Y방향 W/ NBW Model의 층간 변위비는 12.5% 감소하였다.

2) 압축 변형률에 대한 검증을 실시한 결과, W/O NBW에 대해서 4개 지진과 중 최대값은 0.0009 (Q1)으로 나타났고, W/ NBW에 대해서 4개 지진과 중 최대값은 0.0016 (Q1)으로 허용 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

대부분의 벽체 관련 연구는 전단벽 및 구조물 전

체의 내진 성능 확보를 위한 보강재로서만 수행되었다. 본 연구는 수벽 및 날개벽과 같은 비내력벽에 대한 내진 성능 확보, 균열 하자 및 탈락 방지 등 비내력벽의 피해로 인한 구조물의 구조 요소 손상을 방지할 수 있는 기술로서 기존 연구와 비교하여 차별성이 뚜렷하다. 본 연구와 유사한 끼움벽, 개구부가 있는 조적조 내진 보강 연구가 있지만 전체 시스템에서의 내진 성능 향상을 중점으로 연구가 수행된 점이 다르다고 할 수 있다. 비구조벽은 양 옆에 위치하는 구조벽을 일체화(Coupling)하는 효과를 발생시키며 이는 강도와 강성의 증가를 가져온다. 또한 의도치 않게 비구조벽의 지진력의 에너지 소산을 일정 부분 담당하여 손상이 발생할 수 있다. 이러한 효과에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학 기술진흥원 기술축진 연구사업의 연구비지원(19CTAP-C143093-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

References

1. Oh, S. H., Park, H. Y., & Choi, K. K., "Current Status and Characteristics of Non-structural Seismic Damage", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.28, No.3, pp.12~19, 2018
2. Moon, K. H., Jeon, Y. R., Lee, C. S., & Han, S. H., "Evaluation of Performance of Korean Existing School Buildings with Masonry Infilled Walls Against Earthquakes", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.16, No.6, pp.37~46, 2012
3. Computers and Structures, Inc, "PERFORM-3D User Guide", ver 7, CSI, pp.2~28, 2000
4. American Society of Civil Engineers. (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (Report No. FEMA 356). Federal Emergency Management Agency (FEMA): USA.
5. Hong, Y. K. (2010). Performance-Based Seismic Design of Suspension Bridge Using Nonlinear Inelastic Analysis (Master's thesis). Sejong University, Republic of Korea.
6. Korea Infrastructure Safety Corporation, "Guidelines and Improvement Guidelines for Seismic Performance Evaluation of Existing Structures (Buildings)", 2011
7. Architectural Institute of Korea, "Seismic Design Criteria and Description of Buildings", 2016
8. Architectural Institute of Korea, "Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Apartment House", 2016
9. Korea Concrete Institute, "2012 Analysis of Structural Criteria of Concrete", 2012
10. SH Corporation Urban Research Institute, "Architectural Design Guidelines for SH Construction Apartment Housing", 2014
11. Architectural Institute of Korea, "Architectural Structural Design Criteria and Explanation", 2016
12. ASCE/SEI 41-06, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings", American Society of Civil Engineers, 2006

- Received : August 19, 2019
- Revised : September 04, 2019
- Accepted : September 04, 2019