

## 고층 아파트 구조시스템에 따른 내진성능 분석

이민희<sup>1</sup> · 조소훈<sup>1\*</sup> · 김종호<sup>1</sup> · 김형도<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)창민우구조건설탄트 설계본부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 복합재난대응연구원

### Seismic Capacity according to Structural System of High-rise Apartment

Minhee Lee<sup>1</sup>, So-Hoon Cho<sup>1\*</sup>, Jong-Ho Kim<sup>1</sup> and Hyung-Do Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Structural Design, Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 06125, Korea

<sup>2</sup>Muti-Disaster Countermeasures Organization, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsan, 10223, Korea

#### Abstract

The structural system of domestic high-rise apartments can be divided into two parts; the core wall system, which is composed of walls concentrated in the center and the shear wall system, which comprises a great number of walls distributed in the plan. In order to analyze the lateral behavior of each system, buildings with typical domestic high-rise apartment plans were selected and nonlinear static analysis was performed to investigate their collapse mechanism. From the force-displacement relation derived from nonlinear static analysis, response modification factor was evaluated by calculating the overstrength and ductility factor, which are important in the seismic response. The ductility of core wall system is small, but as it is governed by wind load, its overstrength is greatly estimated, and its response modification factor is calculated by the overstrength factor. Due to a large number of walls, shear wall system has a large ductility, making the response modification factor considerably large.

**Keywords** : building frame system, shear wall system, pushover analysis, overstrength factor, ductility factor, response modification factor

#### 1. 서 론

국내 고층 건축물은 주거시설이 대부분을 이루고 있다. 국내 아파트 건축 평면계획도는 건물이 시공된 시기에 따라서 유행하는 형식이 있는데, 초고층 건물이 많이 지어진 2000년대에는 “+”자형, “Y”자형의 타워형 평면이 많이 적용되었고, 그 이전에는 대다수가 판상형이었다. 그리고 2010년 이후부터 최근까지는 판상형과 타워형이 결합된 “L”자형, “Y”자형의 평면이 많이 적용되고 있다. 이러한 형상의 국내 아파트의 구조시스템은 크게 2가지로 구분될 수 있다. 다수의 전단벽이 분산적으로 배치되어 있는 내력벽 시스템과 중앙의 코어벽과 중력 저항 골조로 이루어져 있는 건물골조시스템으로 구분할 수 있다. 중앙 코어벽 시스템은 보다 더 고층 건물에서 많이 적용되고 있다.

내력벽 시스템의 아파트는 20~40층에 적용되는 반면, 중앙 코어벽 시스템의 아파트는 40~65층에 적용되고 있다. 중앙 코어벽 시스템 아파트는 고층화가 될수록 코어벽만으로는 횡력에 저항하기 어려우므로 아웃리거(outrigger)나 벨트월(belt wall)이 추가되어 진다.

아파트의 층수가 높아질수록 풍하중에 의해 지배되어 지진 하중 지배 구조물보다 더 큰 초과강도를 가지게 된다. 여기서 구조물의 초과강도는 설계 밀면전단력에 대한 최대밀면전단력의 차이로 기준에서는 2로 제시하고 있지만, 풍하중이 지배하게 되면 초과강도는 그 이상 가질 것으로 보인다. 초과강도는 연성도와 함께 설계기준에서 제시하는 반응수정계수( $R$ )를 결정한다. 풍하중 지배로 설계된 구조물의 경우 초과강도가 커지게 되면, 연성도에 따라 반응수정계수가 달라질 수 있다. 국내 고층

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2085-7160; E-mail: cshoon@minwoo21.com  
Received February 15 2019; Revised February 26 2019;  
Accepted February 27 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

아파트에서 주를 이루고 있는 구조시스템의 반응수정계수는 4~6(내력벽, 건물 골조시스템 중 철근콘크리트 전단벽 시스템) 정도이다. 반응수정계수는 설계 지진력을 결정하는 중요한 요소가 되므로 기준에서 제시하고 있는 값에 대한 재평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

이에 따라 본 연구는 국내 고층 아파트 중 대표적인 평면을 갖는 대상 건물 3개동을 선정하고, 비선형 정적해석을 수행하여 구조시스템에 따른 붕괴메커니즘을 살펴보았다. 또한 비선형 정적해석을 통해 도출된 힘-변위 관계로부터 초과강도계수 및 연성도 계수를 산정하여 반응수정계수를 기준에서 제시하고 있는 값과 비교하였다.

## 2. 반응수정계수

현재 내진설계기준에서는 구조물의 비탄성 거동을 반영하기 위해 반응수정계수( $R$ )를 사용하여 응답 스펙트럼을 감소시켜 저감된 설계 지진력을 사용한다. 반응수정계수는 연성 상세를 가진 구조물이 설계강도를 초과한 수평하중이 작용하더라도 붕괴되지 않고 연성적으로 소성변형을 충분히 할 수 있다는 전제조건하에 설정되었다.

ATC 34, ATC 19(1995)에서는 반응수정계수를 다음 식과 같이 3가지 요소로 표현하는 산정식을 제시하였다.

$$R = R_s R_\mu R_R \quad (1)$$

여기서,  $R_s$ 는 초과강도계수이고,  $R_\mu$ 는 연성도계수이고,  $R_R$ 는 여유도계수(redundancy factor)이다. 여유도계수는 구조물의 지진이 작용하는 방향에 대해서 골조가 여러 열에 걸쳐 있으므로 개선된 골조의 신뢰성을 정량화한 것이다.

여유도계수는 구조시스템의 종류에 따라서 구분하기가 어려운 부분이 있고 현재의 내진설계가 단자유도 구조물의 응답 스펙트럼을 이용하기 때문에 기준상에서 여유도 계수를 반영하기 어려운 측면이 있다. 그리고 해외에서는 국내 아파트와 같이 구조벽체가 구조물 전체에 골고루 분포하고 이로 인하여 구조물의 연성능력이 향상되는 구조시스템이 드물기 때문에 이를 기준에서는 거의 반영하지 않고 있다

국내 아파트는 전체적으로 고른 벽체 배치를 가지는 평면을 가지는 경우가 많으므로 여유도 계수가 다른 구조물에 비하여 상대적으로 큰 값을 가질 수 있고 이런 아파트가 널리 이용되기 때문에 이를 고려한 반응수정계수를 적용하면 사회적인 측면에서는 구조물의 경제성을 많이 향상시킬 수 있을 것이다.

초과강도계수와 여유도계수는 비선형 정적해석을 통해 구조물의 하중-변위관계를 도출함으로써 평가할 수 있다. 초과

강도계수는 최대 밀면전단력( $V_{max}$ )과 설계 밀면전단력( $V_d$ )의 비이다. 연성도계수를 산정하기 위해서는 변위연성비( $\mu$ )와 연성도계수 사이의 관계를 도출하는 과정이 필요하다. 변위연성비( $\mu$ )는 구조물의 항복변위에 대한 최대변위의 비이다.  $\mu-R_\mu$  관계를 규정하는 많은 연구가 수행되었다.

Newmark와 Hall(1982)은 완전탄소성(elastic-plastic) 단자유도(SDOF) 시스템의  $\mu-R_\mu-T$  관계식을 제안하였고, Krawinkler와 Nassar(1992)는 미서부 지진과 기록(규모 5.7~7.7) 15개를 근거로 하여 암반이나 견고한 지반에서 단자유도(SDOF)시스템의  $\mu-R_\mu-T$  관계식을 제안하였다. 그리고 Krawinkler와 Nassar(1992)은 다자유도(MDOF) 시스템에 대한  $\mu-R_\mu-T$ 의 관계도 연구하여 다자유도 시스템의 최대 변위 연성비를 단자유도 시스템의 변위 연성비로 제한하기 위한 보정계수를 제시하였다. Miranda와 Bertero(1994)는 다양한 토질 상태에서 계측된 123개의 지진기록을 바탕으로 암반, 충적토, 연약 지반에서의  $\mu-R_\mu-T$ 의 관계식을 제시하였다.

본 논문에서는 앞에서 소개한 3개의 방법으로 연성도를 각각 산정하고, 이를 평균하여 대상 구조물의 연성도 산정에 적용하였다.

## 3. 대상 구조물 선정

국내 고층 아파트의 반응수정계수를 평가하기 위해 국내 아파트의 대표적인 평면 형태 및 구조시스템을 갖는 아파트를 선정하였다. 대상으로 한 아파트는 총 3개 동이며, 각 구조물의 평면 형태 및 개요를 Table 1에 나타내었다.

A동은 59층 규모의 중앙의 코어벽과 Flat Slab로 이루어져 있는 건물골조시스템이고, B, C동은 각각 28층, 23층이고 다수의 전단벽이 분산적으로 배치되어 있는 내력벽 시스템이다.

Table 1 Summary of buildings

Type	Plan	Structural system	Number of stories	Period (sec.)	
				1st	6.70(UY)
A		RC core wall + RC flat plate slab (equivalent frame)	B5/59F	2nd	6.04(UX)
				3rd	2.69(RZ)
				1st	3.84(UX)
B		RC shear wall	B2/28F	2nd	2.92(UY)
				3rd	2.91(RZ)
				1st	2.55(DX)
C		RC shear wall	B1/23F	2nd	1.92(DY)
				3rd	1.73(RZ)
				1st	2.55(DX)

**Table 2** Comparison of Base Shear

Type	X-dir.		Y-dir.	
	Wind	Seismic	Wind	Seismic
A	22,166kN	20,304kN	26,457kN	20,304kN
B	3,586kN	6,814kN	7,970kN	6,814kN
C	6,573kN	7,867kN	15,496kN	7,867kN

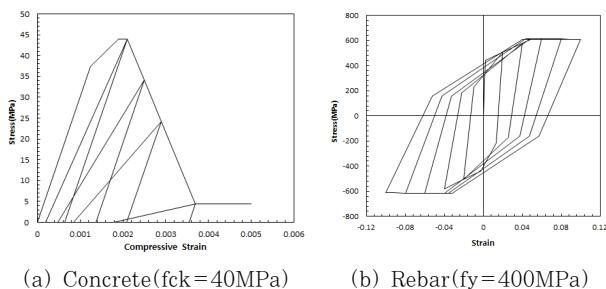
A동의 평면 형태는 타워형의 “Y”자형이고, B, C동은 판상형의 “—”자형과 타워형이 혼합된 형태로 각각 “L” 자형, 긴 “Y”자형이다. C동의 경우 판상형 부분이 더 길어, 총 5세대가 한 층에 구성되고, B동의 경우 4세대로 구성된 형태이다.

Table 2는 각 구조물의 설계 풍하중 및 지진하중에 따른 밀면전단력을 정리한 것이다. 대상구조물의 지배되는 설계수평하중을 비교하기 위해 계수하중으로 정리하였다. 풍하중은 1.3배한 값이고, 지진하중은 응답스펙트럼에 의한 밀면전단력이 등가 정적해석법에 의한 밀면전단력의 85% 이상이 되도록 보정계수를 곱한 값이다. A동의 횡력저항 시스템은 2-o. 철근 콘크리트 보통전단벽( $R=5$ )이고, B, C동은 1-b. 철근콘크리트 보통전단벽( $R=4$ )이다. A동의 내진등급은 특등급( $I=1.5$ )이고, B, C동은 1등급( $I=1.2$ )이다. A동은 풍하중이 지배하고, B, C동의 X방향은 지진하중, Y방향은 풍하중이 지배한다.

#### 4. 비선형 정적해석

##### 4.1 비선형 해석모델 구축

대상 구조물의 비선형 정적해석을 수행하기 위해 PERFORM 3D를 사용하여 비선형 해석모델을 구축하였다. 해석모델은 벽체 및 연결보의 비선형 특성을 포함하고 있다. 벽체는 Fiber요소를 사용하여 모델링하였으며, 기대강도가 적용된 콘크리트 및 철근의 응력과 변형을 관계로 정의하였다(Fig. 1). 콘크리트는 인장영역을 무시하였고, 수정 Kent-Par모델의 비구속 콘크리트 부재를 표현한 곡선을 참조하여 압축 최대강도에 대응하는 변형률이 0.002가 되는 곡선을 구현하였다. 콘크리트 재료의 탄성계수는 KCI 2012의 탄성계수 계산식을 따랐다. 철근의 물성치는 콘크리트와 마찬가지로 기대강도계수를 적용하여



**Fig. 1** Material models

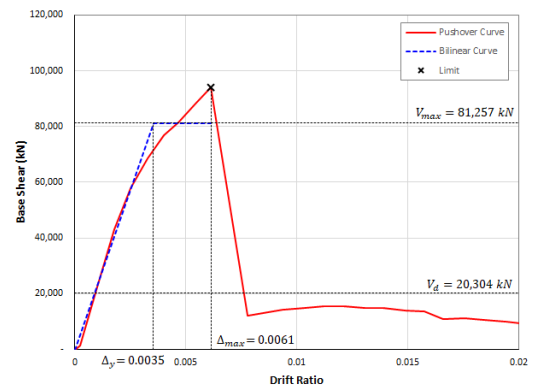
삼선형 곡선으로 입력하였다. 연결보는 힌지모델을 사용하여 비선형 특성을 입력하였다. A동의 경우, Flat Slab을 등가의 유효보로 치환하여 입력하였고, 횡력에 대해 코어벽이 저항하기 때문에, 기둥과 유효보는 탄성으로 입력하였다.

내진성능평가를 위한 정밀해석에서는 지반-건축물의 상호관계를 고려하기 위하여 지하층 구조물을 반드시 고려한다. 지하층 모델링은 공동주택 성능기반 내진설계지침(2017)에 따라 상부 구조물과 지하층 구조물은 고려하되 지표면에 작용하는 지진력을 기초면에 작용시키는 모델을 적용하였다.

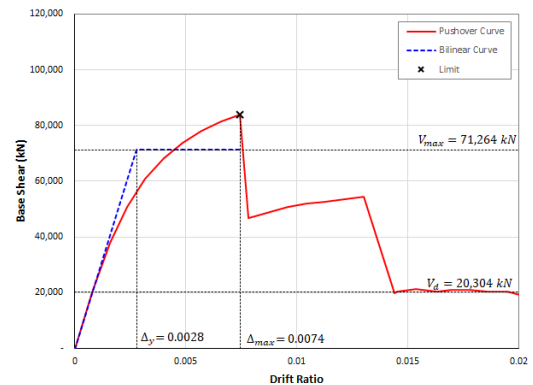
##### 4.2 대상 구조물의 붕괴 메커니즘

대상 구조물의 비선형 정적해석(pushover analysis)을 수행하여 다음 Fig. 2~4와 같이 하중-변위 곡선을 도출하였다. Pushover 해석 시 횡하중 분포는 대상 구조물 모두 고층 건물로 유연한 구조물이기 때문에 고차모드의 영향을 고려하였다.

중앙 코어벽 시스템인 A동의 하중-변위 곡선을 보면, X, Y 방향 모두 항복이후 강성이 줄어들면서 최대 밀면전단력에 도달한 직후, 각각 층간변위비 0.0061과 0.0074에서 밀면전단력이 급격하게 저하된다. X방향은 밀면전단력이 10%까지 감소하였다. 최하층인 지하5층 압축 측에 있는 코어 전단벽의

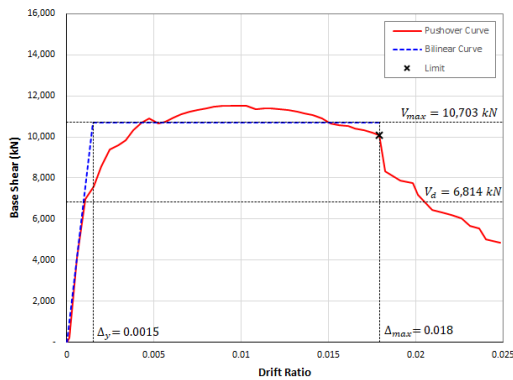


(a) X-dir.

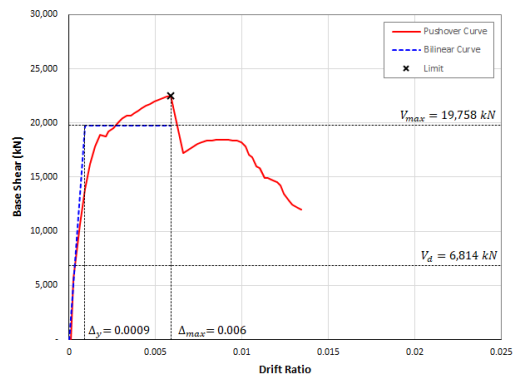


(b) Y-dir.

**Fig. 2** Pushover curve(Type A)

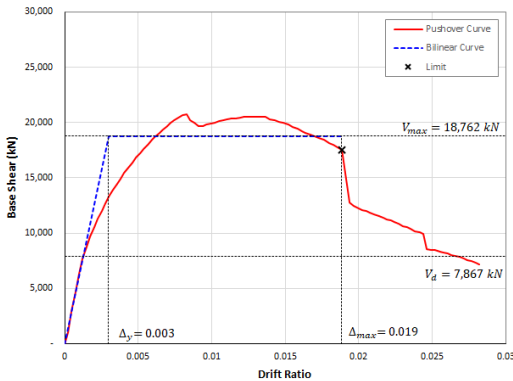


(a) X-dir.

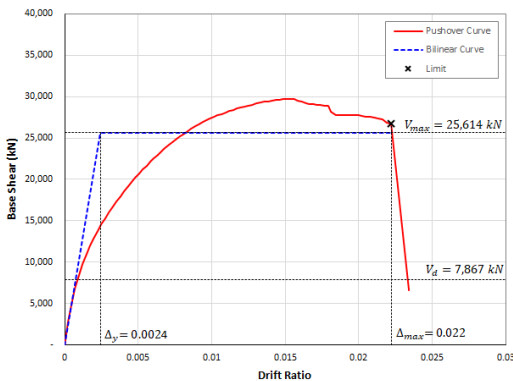


(b) Y-dir.

Fig. 3 Pushover curve(Type B)



(a) X-dir.



(b) Y-dir.

Fig. 4 Pushover curve(Type C)

콘크리트의 압축변형률이 0.002를 초과하여 밀면전단력이 급격하게 저하된 것으로 나타났다. 이때, 연결보의 소성힌지 범위도 확대되었다. X방향은 한 번에 평면의 절반 이상 벽체들의 압축 내력이 초과하였고, Y방향은 두 번째 급감하는 지점에서 평면의 절반이상 벽체들이 압축 내력이 초과한 것으로 나타났다. 내력벽 시스템인 B, C동의 경우, A동보다 더 연성적인 거동을 보인다. 연결보에서 먼저 항복하기 시작해서 저층부 벽체 일부벽체에서 압축변형률 0.002를 초과한다. 밀면전단력이 감소하는 지점에서는 압축변형률이 0.002를 초과하는 벽체와 연결보의 소성힌지의 범위가 확대되었다.

3개 동의 하중-변위 곡선으로부터, 각 시스템에 따른 붕괴 메커니즘을 확인할 수 있었다. 내력벽시스템인 B, C동은 다수의 벽체들이 분산적으로 배치되어 순차적으로 일부벽체들의 압축 내력이 감소하여 건물의 전체 밀면전단력의 감소되는 정도가 완만하다. 반면 중앙 코어벽 시스템인 A동은 평면 중앙에 전단벽이 집중되어 한 번에 많은 벽체들이 내력이 감소하여 전체 건물의 밀면전단력도 급격하게 저감되는 것을 알 수 있었다.

### 4.3 대상 구조물의 반응수정계수

연성도계수, 초과강도계수, 반응수정계수를 산정하기 위하여 3개동의 하중-변위 곡선을 Fig. 2~4와 같이 이선형(bilinear) 곡선으로 나타내었다. 최대 응답에 해당하는 지점은 밀면전단력이 급격하게 저감되는 시점으로 설정하여 하중-변위곡선의 면적과 이선형 곡선의 하부 면적이 같도록 이선형 곡선을 설정하였다.

Table 3은 2장에서 설명한  $\mu - R_\mu - T$  관계식에 의해 산정한 연성도계수를 정리한 것이다. 이선형 곡선으로부터 산정한 초과강도계수( $R_s$ ) 및 연성도계수( $R_\mu$ ), 반응수정계수( $R$ )은 Table 4에 정리하였다. Table 4에 정리한 연성도계수는 3개의 제안 식에서 구한 연성도계수(Table 3)를 평균한 값이다.

초과강도계수는 풍하중의 영향이 큰 고층 건물 A동과 B, C동 Y방향에 더 큰 것을 확인할 수 있다. 지진하중에 의하여 설계된 B, C동 X방향의 초과강도계수는 각각 1.57, 2.38 정도이다. 연성도계수는 벽량이 많은 내력벽시스템인 B, C동이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 중앙 코어벽 시스템인 A동은 내력벽 시스템인 B, C동과 비교하여, 연성도계수는 작은데 반해, 초과강도계수는 큰 값으로 산정돼 반응수정계수는 기준에 의한 반응수정계수 5보다는 큰 값인 6.95(X방향), 9.41(Y방향)로 산정되었다. 내력벽 시스템인 B, C동은 초과강도계수는 작은데 반해, 연성도계수가 상당히 크게 산정돼 반응수정계수도 기준에 의한 반응수정계수 4보다 훨씬 큰 15.59에서 29.6의

**Table 3** Ductility factor( $R_{\mu}$ )

	Type A		Type B		Type C	
	X-dir.	Y-dir.	X-dir.	Y-dir.	X-dir.	Y-dir.
Newmark and Hall(1982)	1.74	2.67	11.88	6.46	6.32	9.18
Krawinkler and Nassar(1992)	1.75	2.72	14.52	7.37	7.03	10.9
Miranda and Bertero(1994)	1.73	2.64	18.70	6.86	6.26	7.2

**Table 4** Response modification factor( $R$ )

	Type A		Type B		Type C	
	X-dir.	Y-dir.	X-dir.	Y-dir.	X-dir.	Y-dir.
$V_d$ (kN)	20,304	20,304	6,814	6,814	7,867	7,867
$V_{max}$ (kN)	81,257	71,264	10,703	19,758	18,762	25,614
$\Delta_y/H$	0.0035	0.0028	0.0015	0.0009	0.003	0.0024
$\Delta_{max}/H$	0.0061	0.0074	0.018	0.006	0.019	0.022
Ductility Ratio( $\mu$ )	1.74	2.67	11.88	6.46	6.32	9.18
Overstrength Factor( $R_s$ )	4.00	3.51	1.57	2.90	2.38	3.26
Ductility Factor( $R_{\mu}$ )	1.74	2.68	15.03	6.90	6.54	9.09
Response Modification Factor( $R$ )	6.95	9.41	23.61	20.00	15.59	29.60

범위로 산정되었다.

구조시스템별 반응수정계수를 정리해 보면, 중앙 코어벽 시스템은 연성도가 작지만, 초과강도가 크기 때문에 초과강도계수에 의해 반응수정계수가 산정됨을 알 수 있었다. 내력벽 시스템은 연성도가 상당히 크기 때문에 연성도계수에 의해 반응수정계수도 크게 산정되고, 풍하중이 지배되는 내력벽시스템의 경우 초과강도도 크게 산정되어 반응수정계수는 상당히 크게 산정된다. 이에 따라 국내 내력벽 시스템 아파트의 경우, 벽량이 많아 상당히 큰 연성도를 갖고 있으므로 반응수정계수를 재평가하여 보다 합리적으로 지진하중을 산정해야 될 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 국내 고층 아파트 중 대표적인 평면을 갖는 대상 건물 3개동을 선정하였고, 비선형 정적해석을 수행하여 각 시스템에 따른 초과강도계수, 연성도계수 및 반응수정계수를 구할 수 있었다. 이로부터 얻은 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 국내 고층 아파트의 구조시스템은 크게 다수의 벽체가 분산적으로 배치되어 있는 내력벽 시스템과 중앙 코어벽 시스템으로 구분할 수 있다. 중앙 코어벽 시스템은 내력벽시스템보다 더 고층에 적용되어 풍하중에 지배되기 때문에 더 큰 초과강도를 갖는다.

- (2) 시스템에 따른 붕괴메커니즘을 보면, 내력벽시스템은 다수의 벽체들이 분산적으로 배치되어 순차적으로 벽체들의 내력이 감소하면서 구조물의 밀면전단력이 완만하게 감소하는데 반해, 중앙 코어벽 시스템은 평면 중앙에 전단벽이 집중되어 하나의 벽체 비중이 크므로 벽체가 항복할 경우에 내력이 크게 감소하여 구조물의 밀면전단력도 급격하게 저감되는 것을 알 수 있었다.
- (3) 중앙 코어벽 시스템은 연성도가 작지만, 초과강도가 크기 때문에 초과강도계수에 의해 반응수정계수가 산정된다. 국내 고층 아파트 중 내력벽 시스템은 우리나라만의 독특한 구조형식을 가지고 있으며, 벽량이 많기 때문에 큰 연성도를 갖고 있는 것으로 평가되므로 반응수정계수를 재평가하여 보다 합리적으로 지진하중을 산정할 수 있도록 논의가 필요할 것으로 보인다.
- (4) 대상 구조물은 고층 건물로 고차모드의 영향이 크기 때문에 비선형 정적해석만으로 내진 성능을 분석하는데에는 한계가 있다. 추후 동적해석을 통해 정적해석 결과와 비교 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-16-02-KICT)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- AIK** (2017) *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Residential Buildings*, Architectural Institute of Korea.
- ATC** (1995) *ATC-19 Structural Response Modification Factors*, Applied Technology Council.
- Computer & Structures Inc.** (2016) *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures-User Guide Version 6*.
- KCI** (2012) *Korea Structural Concrete Design Code-2012*, Korea Concrete Institute. Seoul. Korea.
- Krawinkler, H., Nassar, A.A.** (1992) *Seismic Design Based on Ductility and Cumulative Damage Demands and Capacities*, Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings, pp.27~47.
- Lee, D.G, Cho, S.H., Ko, H., Kim, T.J.** (2006) Overstrength and Response Modification Factor in Low Seismic Regions, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 10(3), pp.57~64.

**Miranda, E., Bertero V.V.** (1994) Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design, *Earthq. Spectra. EERI*, 10(2), pp.357~379.

**Newmark, N.M., Hall, W.J.** (1982) *Earthquake Spectra And Design*, Earthquake Engineering Research Institute.

---

## 요 지

국내 고층 아파트의 구조시스템은 크게 다수의 벽체가 분산적으로 배치되어 있는 내력벽 시스템과 중앙 코어벽 시스템으로 구분할 수 있다. 각각 시스템에 따른 횡방향 거동을 분석하기 위해 본 연구는 국내 고층 아파트 중 대표적인 평면을 갖는 대상 건물을 선정하고, 비선형 정적해석을 수행하여 붕괴메커니즘을 살펴보았다. 비선형 정적해석을 통해 도출된 힘-변위 관계로부터 지진응답에 있어서 중요한 요소인 초과강도계수 및 연성도계수를 산정하여 반응수정계수를 평가하였다. 중앙 코어벽 시스템은 연성도는 작지만, 풍하중에 의해 지배되어 초과강도가 크게 산정돼 초과강도계수에 의해 반응수정계수가 산정되었고, 내력벽 시스템은 벽량이 많아 연성도가 크기 때문에 상당한 큰 반응수정계수가 산정된다.

**핵심용어** : 건물골조 시스템, 내력벽 시스템, 비선형 정적해석, 초과강도계수, 연성도계수, 반응수정계수