

필로티형 콘크리트 전단벽 구조물의 능력스펙트럼기반 손상도 기준에 대한 연구

황지현¹, 박기태¹, 박태원^{2*}

¹한국건설기술연구원 SOC성능연구소, ²단국대학교 건축공학과

A Study on Damage State Criteria based on Capacity Spectrum of Piloti-type RC Shear Wall Structures

Ji-Hyun Hwang¹, Ki-Tae Park¹ and Tae-won Park^{2*}

¹SOC Institute, Korea Institute of Construction Technology

²Department of Architectural Engineering, Dankook University

요 약 최근 증가한 지진의 발생빈도에 비해 현존하는 건물 중 내진설계가 되지 않았거나 노후화, 구조특성 등으로 적절한 내진성능을 보유하지 않은 건물은 매우 많다. 특히 우리나라 건물 유형 중 하나인 필로티형 콘크리트 전단벽 구조물은 대부분 1층이 연층(soft story) 및 약층(weak story)으로 분류되기 때문에 지진에 의한 횡력에 저항할 수 있는 전단기능이 크게 결여되어 지진에 매우 취약하다. 본 연구에서는 필로티형 콘크리트 전단벽 구조물의 손상도 기준에 관한 연구를 수행하였다. 전단벽 시스템의 대표 유형 건물을 선정하여 구조해석을 통해 능력스펙트럼을 산출하였으며 능력스펙트럼의 형태를 기준으로 손상도 기준을 정의하였다.

Abstract Despite the increasing incidence of earthquakes in recent years, many of the existing buildings don't have appropriate seismic performance due to the deterioration or structural characteristics. In particular, a piloti-type RC shear wall structure, which is one of the building types in Korea, is highly vulnerable to earthquakes due to a great lack of shear function that can resist lateral force caused by the earthquake since the first floor is mostly soft story, and it is classified as weak story. In this regard, a study on the damage state criterion for the piloti-type RC shear wall structures was carried out. The capacity spectrum was calculated through the structural analysis by selecting typical type of buildings of shear wall systems, and damage state criterion was defined based on the shape of the capacity spectrum.

Key Words : Capacity spectrum, Damage state criterion, Piloti-type RC shear wall structure, Seismic performance

1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 지진의 발생빈도가 높아져가고 있다[1]. 특히 우리나라는 내진설계기준이 1988년에 도입되었으므로 이전에 지어진 건물 및 이후에 지어진 건물의 경우도 내진설계 적용대상에서 제외된 5층 이하의 건물은 내진성능 평가 및 보강이 시급하다. 그중에서도 최근 도시지역에서 부족한 주거용 대지를 효율적으로

활용하기 위해 저층부에 개방공간을 두는 필로티형 콘크리트 전단벽 구조물은 하층이 상부층에 집중되기 때문에 대부분 1층이 연층(soft story) 및 약층(weak story)이 되어 지진 발생 시 횡력에 저항할 수 있는 전단기능이 크게 떨어진다[2].

실제로 이정재(2008)등이 필로티형 저층 RC 주택의 내진성능평가를 수행한 결과를 보면, FEMA356기준에 따라 검토했을 때 벽체의 경우 요구수준을 만족하지 못

본 논문은 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업(건축/대형구조물의 안전관리를 위한 내외피용 IT기반 고정밀도 패치/임플란트시스템 기술 개발)의 연구비지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Tae-won Park(Dankook Univ.)

Tel: +82-31-8005-3751 email: tw001@dankook.ac.kr

Received August 7, 2013

Revised (1st October 4, 2013, 2nd October 9, 2013)

Accepted October 10, 2013

하는 것으로 나타났다[3]. 김민수(2003) 등도 필로티 아파트 건물의 내진성능 평가를 수행한 결과 내진성능이 부족하여 보강이 필요한 것으로 나타났다[4]. 이처럼 지진에 취약한 구조인 필로티 구조물은 내진성능 평가 시 콘크리트모멘트골조시스템이나 전단벽시스템에 비해 보다 엄격한 손상도 기준이 필요하다.

본 연구에서는 필로티형 콘크리트 전단벽 구조물의 손상도 기준에 관한 기초자료 제시를 목적으로 연구를 수행하였다. 이를 위해 전단벽 시스템의 대표 유형 건물을 선정하여 구조해석을 통해 능력스펙트럼을 산출하였으며, 능력스펙트럼의 형상에 기초하여 손상도 기준을 제시하였다.



[Fig. 1] Piloti-type RC Shear Wall Structures
(a) low-rise building (b) High-rise building

내진성능평가와 관련하여 미국 HAZUS에서는 구조해석을 수행해서 얻어진 능력스펙트럼이 아닌 내진설계기준을 통해서 얻어진 설계강도계수와 다수의 경험적 자료를 통해 도출된 초과강도계수 및 연성계수를 이용하여 능력스펙트럼을 사용하고 있으며, 손상도 기준도 여러 문헌조사를 통하여 얻어진 값을 사용하고 있다[5]. 반면, 본 연구에서는 구조해석을 통해 얻어진 건축물의 능력스펙트럼을 적용하고 있기 때문에 국내건축물의 특성을 반영한 손상도 기준을 제시하고자 하였다. 구조물의 전반적인 거동이 능력스펙트럼에 반영되어 있다고 보고 능력스펙트럼의 형태를 기준으로 손상도 기준을 정의하였다.

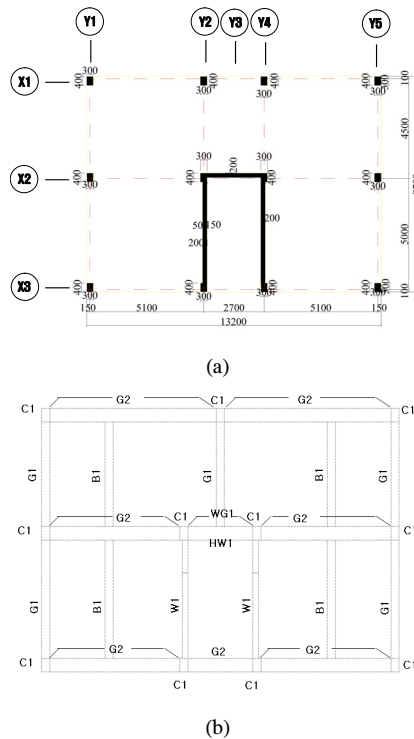
2. 해석대상 건축구조물 개요

해석대상 구조물을 선정하기 전 국내에 건설된 필로티형 건물에 대한 사례조사 후, 내진설계 수준에 따라 내진설계되지 않은 Pre-code, 개정 전 낮은 기준의 내진설계 코드인 Low-code, 강화된 내진설계 코드인 Moderate-code로 분류하였다.

필로티형 콘크리트 전단벽 건물시스템은 시스템이 가지고 있는 전단벽식 구조의 특성으로 인하여 대부분 공동주택으로 적용되고 있다. 이 중 저층형 시스템은 5층 이하의 건물로 내진설계code의 적용을 받지 않아 대부분의 구조설계도서에는 내진설계 적용 예가 없는 것으로 파악되었다. 또한 고층형 시스템은 최근 이 시스템의 도입으로 설계시기가 2005년 이후의 시공사례만이 있어서 본 연구의 대상인 Pre-code와 Low-code대상인 건물의 예를 찾기 어려웠으며, 구조사무실의 설계자료에서도 이에 대한 사항을 찾을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 저층형 시스템은 Pre-code를 대상으로 연구를 수행하였으며, 고층형 시스템은 KBC-2005에 의해 설계된 Moderate-code대상인 건물에 대해서만 연구를 수행하였다.

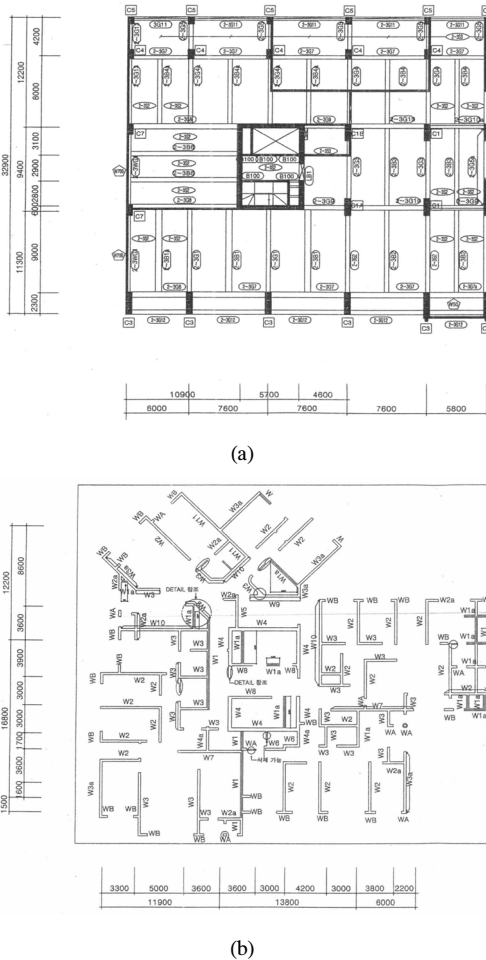
2.1 건물형상 및 치수

저층형 대상구조물의 1층은 필로티 형식이고 상부 벽식 부분은 4층으로 이루어졌으며 기둥의 배치는 좌우 대칭인 형태이고 주차장은 주출입구 계단실을 중심으로 좌우 양쪽으로 위치해 있다. 표준대상구조물의 입면도는 Fig. 2과 같다.



[Fig. 2] Floor plan of low-rise model building
(a) Piloti section (b) Shear wall section

필로티형 콘크리트 전단벽 고층건물의 전형적인 평면과 입면을 갖는 건물의 평면은 Fig. 3와 같다. 건물의 하층부는 32.7m×30.4m의 철근콘크리트 모멘트골조형식의 정방형평면을 가지고 있으며 지상 3층까지는 쇼핑몰로 이용되고 있고 4층은 전이보층, 5~20층까지는 층별 3세대 조합으로 이루어진 철근콘크리트 전단벽식구조물로서 그 용도는 주거시설로 구성되어 있다. 전이보는 보층이 1m의 깊은보로서 상층부의 하중을 모멘트골조에 부담시키는 역할을 하고 있는 건물이다.



[Fig. 3] Floor plan of high-rise model building
(a) Piloti section (b) Shear wall section

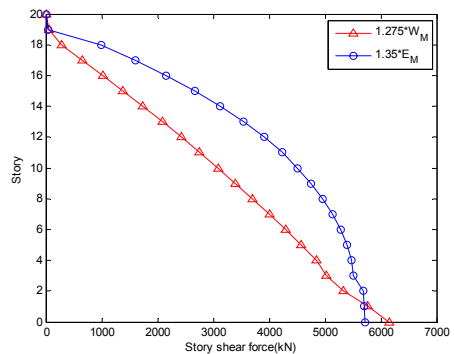
2.2 구조설계 조건

저층형 표준대상구조물은 내진설계가 되지 않은 것으로 가정하였으며, 이에 따라 중력 하중에 의한 설계가 수행되었다. 따라서, 기둥, 보, 벽체에 대한 상세 또한 비내진 상세로 가정하였다. 설계강도는 20.6MPa, 철근의 항

복강도는 392MPa이고 기둥, 보, 벽체에 대한 설계는 건축구조기준에 따라 설계되었으며[6], 극한강도 설계법이 이용되었다. 고층형 대상구조물에 고려되는 설계하중은 고정하중, 활하중, 지진하중 및 풍하중을 적용하였다. 대상 건축구조물이 주거용도임을 감안하여 상층부 주거부분의 고정하중은 하중요소를 고려하여 산정하였으며, 활하중은 2.0 kN/m²을 적용하였다. 또한 주차장 및 쇼핑센터로 이용되는 하층부 역시 고정하중은 하중요소를 고려하여 산정하였으며, 활하중은 판매시설 및 승용차량인 경차량 하중인 5.0kN/m²을 적용하였다. 지진하중은 KBC 2005를 기준으로 하였으며[7], 지역계수는 모델 구조물과 같은 형식의 건물이 대부분 수도권을 중심으로 하는 대도시에서 건축되는 동향을 고려하여 0.11을 적용하였다. 지반계수 및 중요도 계수는 구조사무소 조사자료를 참조하여 각각 1.0과 1.2를 적용하였다. 건물의 기본주기는 전단벽이 주요 지진저항시스템임을 고려하여 KBC 2005에서 제시하는 주기산정식 $T=0.0488(h_n)^{3/4}$ 을 적용하였으며[7], 반응수정계수는 건물골조방식 중 철근콘크리트 전단벽에 해당되는 4.0을 공통적으로 적용하였다. 하중조합은 콘크리트구조설계기준에 따라 지진하중에 대한 하중계수 1.35를 적용하여 $U = 0.75(1.4D+1.7L+1.8E) = 1.05D + 1.28L + 1.35E$ 로 하였다[8].

풍하중은 건물이 고층화 될수록 지진하중에 비해 상대적으로 큰 중요성을 가지게 되며, 지진하중에 대해 초과강도를 발생시키는 중요한 요인이 된다. 본 연구에 적용된 모델 건물의 설계풍하중은 KBC 2005에 따라 노풍도 B, 기본풍속 30 m/sec, 중요도계수 0.95를 적용하였다.

예제구조물의 횡력분포를 살펴보기 위하여 설계 지진하중과 풍하중을 Fig. 4과 같이 각 층의 층전단력을 비교하였다. 예제 구조물의 경우 전층에서 지진하중의 밀면전단력이 풍하중보다 지배적인 것으로 나타나 주된 횡력하중으로는 지진하중이 고려되었다.



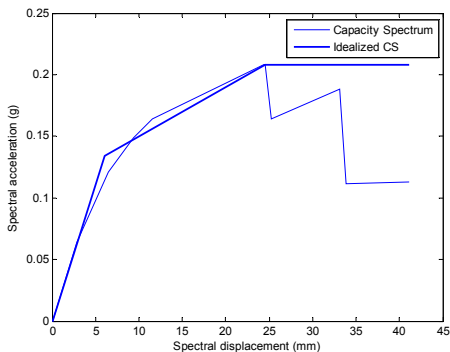
[Fig. 4] Comparison of seismic design loads and wind design loads

3. 능력스펙트럼 산출

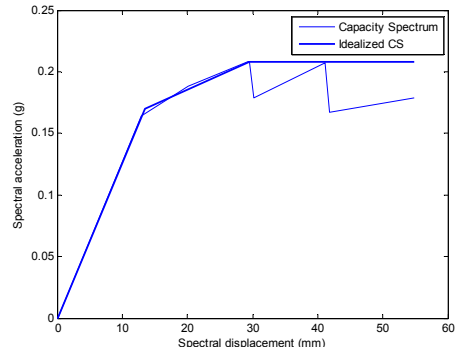
본 연구에서는 Pushover 형태의 비선형정적해석을 수행하여 대상 구조물의 능력스펙트럼을 산출하였다. 그러나 구조해석을 통해 얻어진 능력스펙트럼은 복잡한 형상을 가지고 있으므로 지진피해 예측을 위해 성능점을 찾는 과정에서 해가 수렴하지 않을 수 있으며, 특정 해석모델의 국부적인 특성이 두드러지게 나타날 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 형태를 갖는 능력스펙트럼의 원형을 단순한 형태로 이상화하여 나타내도록 하며, 이와 같이 함으로써 복수의 해석모델을 평균화하여 보다 일반성을 갖는 능력스펙트럼을 산출하였다.

3.1 저층형

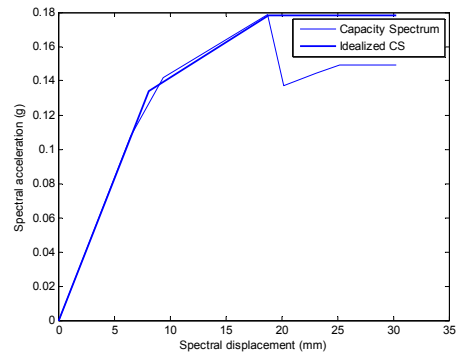
저층형 표준대상구조물의 X,Y 방향에 대한 Push-over 해석결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. 밀면전단력과 최상층변위 그래프를 능력스펙트럼 그래프로 변환한 결과와 능력스펙트럼을 삼선형으로 이상화시킨 능력스펙트럼을 그림에 표시하였다. 삼선형의 이상화된 능력스펙트럼은 능력스펙트럼의 원점부터 최대강도인 극한점까지의 하부면적을 동일하게 만드는 강도를 항복강도로 결정하는 방식을 적용하였다. 이 때, 초기강성은 구조해석으로부터 산출한 능력스펙트럼의 초기강성과 동일하다고 가정하였다. 대표 능력스펙트럼의 항복점 좌표(D_y, A_y)와 극한점 좌표(D_u, A_u)는 각 방향에 대해 Pushover 해석을 통해 얻어진 삼선형으로 이상화된 능력스펙트럼의 항복점 좌표와 극한점 좌표의 평균값으로 구성된다. 평균화하여 얻어진 대표 능력스펙트럼의 산출결과는 Table 1에 나타내었다.



[Fig. 5] Capacity spectrum(Y direction:SN)



[Fig. 6] Capacity spectrum(Y direction:NS)



[Fig. 7] Capacity spectrum(X direction)

[Table 1] Result of capacity spectrum(low-rise)

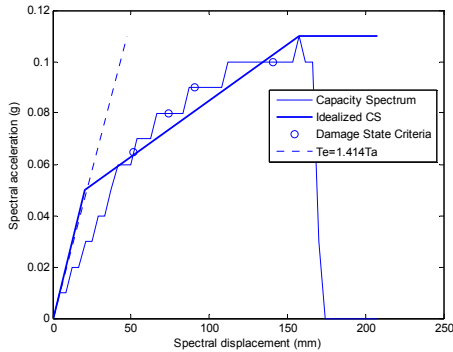
code	floor	spectral acceleration(g)		spectral displacement(mm)	
		A_y	A_u	D_y	D_u
Pre-code	5	0.146	0.198	9.19	24.2667

3.2 고층형

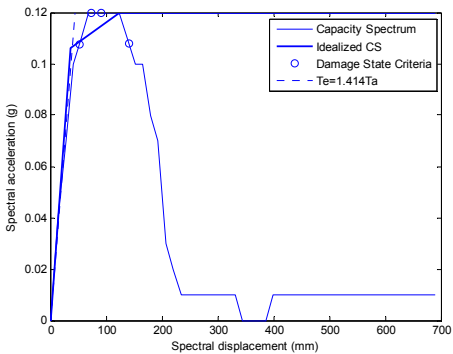
필로티형 콘크리트 전단벽 건물 유형의 대표 능력스펙트럼은 실제 시공된 건물 모델에 대한 Pushover 해석을 통해 얻어진 능력스펙트럼을 삼선형으로 이상화한 뒤 각각의 항복점 좌표와 극한점 좌표를 이용하여 산출하였다. 능력스펙트럼 및 손상도 기준 산출에 기초가 되는 고유치해석 고유주기는 1.667이며 KBC2005에 기초한 구조설계용 약산주기 및 보정주기는 각각 1.036과 1.451로 산정되었다.

하중계수를 포함한 설계지진하중과 설계풍하중은 각각 6155kN과 5714kN이며, 항복밀면전단력과 극한밀면전단력은 943.13kN과 1256.06kN이다. 대표 능력스펙트

럼 산출결과는 Table 2에 정리하였으며, 항복점의 스펙트럴 변위 D_y 는 삼선형 능력스펙트럼의 값을 나타낸다. 밀면전단력과 최상층변위 그래프를 능력스펙트럼 그래프로 변환한 결과와 능력스펙트럼을 삼선형으로 이상화시킨 능력스펙트럼을 Fig. 8과 9에 나타내었다.



[Fig. 8] Capacity spectrum(X direction)



[Fig. 9] Capacity spectrum(Y direction)

[Table 2] Result of capacity spectrum(high-rise)

code	floor	spectral acceleration(g)		spectral displacement(mm)	
		A_y	A_u	D_y	D_u
Moderate-code	20	0.078	0.115	28.635	140.865

3.3 중층형

중층형 시스템은 고층형과 저층형의 해석값을 바탕으로 두 값을 직선보간하여 대표 능력스펙트럼 값을 추정하였다. 직선보간에 의한 능력스펙트럼의 산출결과를 Table 3에 나타내었다.

[Table 3] Result of capacity spectrum(middle-rise)

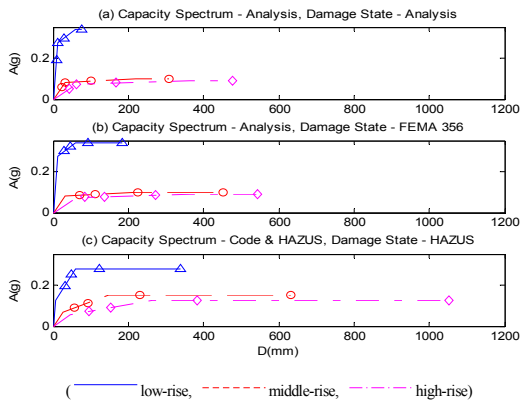
code	floor	spectral acceleration(g)		spectral displacement(mm)	
		A_y	A_u	D_y	D_u
Moderate-code	9	0.096	0.160	25.2	123.9

4. 손상도 기준 산출

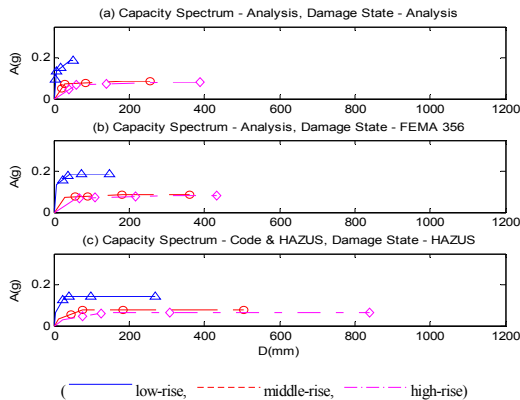
손상상태는 기존 소방방재청 지진재해대응 시스템의 4단계 손상상태 분류에 따라 Slight, Moderate, Extensive, Complete로 분류되어 정의한다. 각각의 상태에 해당되는 구조적 피해양상은 FEMA 356 기준에서 제시하고 있는 구조성능수준(Structural Performance Level) 중에서 기능수행, 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지 수준을 대응 시켜 정의한다. 단, FEMA 356 기준에서는 철근콘크리트전단벽이 있는 철골모멘트골조에 대한 손상상태 정의를 독립적으로 제시하고 있지는 않고, 철근콘크리트전단벽과 철근콘크리트모멘트골조 각각에 대하여 개별적으로 제시하고 있다. 본 연구의 대상구조물 유형은 주요 횡력저항시스템이 철근콘크리트전단벽이고, 철근콘크리트전단벽에 대한 손상도 기준이 철근콘크리트 모멘트골조에 비해 엄격하므로 FEMA 356 기준의 철근콘크리트전단벽에 대한 손상상태 정의를 적용하였다.

능력스펙트럼의 형태에 기초한 손상도 기준은 Slight 수준의 손상도는 항복점 스펙트럴변위의 70% 수준, Moderate 수준의 손상도는 항복점 스펙트럴 변위, Complete 수준의 손상도는 개별 모델에서 강도가 최대강도의 80% 수준으로 저감되는 지점의 스펙트럴변위 평균값으로 정의하였다.

손상도 기준은 능력스펙트럼상의 스펙트럴 변위로 표현되어야 하므로 스펙트럴 변위로 환산하였다. 구조해석을 통해 도출된 능력스펙트럼에 능력스펙트럼 형태에 기초한 4단계 손상도 기준, slight부터 Complete까지 함께 표기하여 Moderate-code를 적용한 경우는 Fig. 10에, Pre-code를 적용한 경우 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 Pre-code와 Moderate-code 모두 구조해석을 통해 도출된 능력스펙트럼이 HAZUS에서 제시한 4단계 손상도 기준에 비하여 강도는 높지만 연성능력은 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 내진설계되지 않은 Pre-code는 Moderate-code에 비해 강도 및 연성능력이 모두 낮게 나타났다.



[Fig. 10] Capacity spectrum and damage state criteria (Moderate-Code)



[Fig. 11] Capacity spectrum and damage state criteria (Pre-Code)

5. 결론

본 논문에서는 국내 건물 유형 중 필로티형 콘크리트 전단벽 구조물의 손상도 기준에 관한 기초자료를 제시하기 위하여 연구를 수행하였다. 전단벽 시스템의 대표 유형 건물을 선정하여 구조해석을 통해 능력스펙트럼을 산출하였으며, 능력스펙트럼의 형상에 기초하여 손상도 기준을 제안하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 필로티형 콘크리트 전단벽 구조의 대표 유형 건물을 선정하여 각 유형의 평균적인 내진성능을 나타내는 능력스펙트럼을 산출하였다. 기존의 능력스펙트럼에 반해 본 연구에서는 국내 고유의 건물 유형별 특성 및 우리나라 구조설계기준의 영향을 반영하기 위해 건축구조물의 비탄성 거동 추정에서 국내 실정에 적합한 지 검증되지 않은 HAZUS

의 초과강도 계수 및 연성계수를 답습하지 않고, 실제 건축물에 대표적인 설계조건을 적용하여 건물의 구조해석을 수행하였다. 그 결과 도출된 능력스펙트럼은 유사한 건축물 유형의 HAZUS에서 제시한 손상도 기준에 비하여 강도는 높지만 연성능력은 떨어지는 것으로 나타났다.

- (2) 손상도 수준을 Slight, Moderate, Extensive, Complete의 4개 수준으로 나누고 각각의 손상도에 해당되는 구조적 손상상태를 정의하였다. 구조해석에 의해 도출된 Pushover Curve의 형상에 기초하여 4단계 손상도 기준을 도출하였으며, 이는 국내 건물 유형을 반영한 능력스펙트럼 기반 손상도 기준으로서 국내 건축물의 내진성능을 평가하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

- [1] Website of Korea meteorological administration (<http://www.kma.go.kr/>)
- [2] National Emergency Management Agency "Development of Seismic Fragility Functions in Korea structures" Earthquake Engineering Society of Korea, 2009.
- [3] J. J. Lee, H. S. Lee, H. C. Kim, "Seismic Performance Evaluation of Piloti-type low-rise RC apartment buildings using Nonlinear Static Analysis" Journal of the Korea Concrete Institute, 2008 Nov. 07, pp. 237~240, 2008.
- [4] M. S. Kim, Y. W. Kwon, "A Study on the Seismic Performance of Shear Wall Apartment with Piloti" Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No.2, pp. 103~106, 2003.
- [5] FEMA, HAZUS99 Technical manual, 1999.
- [6] Architectural Institute of Korea, Korean Building Code-Structural, 1983.
- [7] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Building Code, (KBC-2005), 2005.
- [8] Korea Concrete Institute, Structural Concrete Design Code, 2000.
- [9] ASCE-FEMA, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC, USA; 2000.
- [10] Fajfar, P.A., nonlinear analysis method for performance based seismic design, Earthquake Spectra, Vol.16, No.3, pp.573-592, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1193/1.1586128>

황 지 현(Ji-Hyun Hwang)

[정회원]



- 2011년 2월 : 단국대학교 건축공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 단국대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 인프라구조연구실 연구원

<관심분야>
구조성능평가, 내진보강

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 인프라구조연구실 연구위원

<관심분야>
구조성능평가, IT-건설 융합

박 태 원(Tae-won Park)

[정회원]



- 1998년 2월 : 단국대학교 건축공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 단국대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : 단국대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 2008년 7월 : University of California, Irvine (Post-Doc)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 건축공학과 교수

<관심분야>
구조물 보수보강, 구조성능평가, 내진보강