

# 지진재해도를 고려한 철골 보통중심가새골조의 위험도기반 내진성능

신 동 현<sup>1</sup> · 홍 석 재<sup>1</sup> · 김 형 준<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울시립대학교 건축공학과

## Risk-Targeted Seismic Performance of Steel Ordinary Concentrically Braced Frames Considering Seismic Hazard

Dong-Hyeon Shin<sup>1</sup>, Suk-Jae Hong<sup>1</sup> and Hyung-Joon Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

### Abstract

The risk-targeted seismic design concept was first included in ASCE/SEI 7-10 to address problems related to the uniform-hazard based seismic concept that has been constructed without explicitly considering probabilistic uncertainties in the collapse capacities of structures. However, this concept is not yet reflected to the current Korean building code(KBC) because of insufficient strong earthquake data occurred at the Korean peninsula and little information on the collapse capacities of structures. This study evaluates the risk-targeted seismic performance of steel ordinary concentrically braced frames(OCBFs). To do this, the collapse capacities of prototype steel OCBFs are assessed with various analysis parameters including building locations, building heights and soil conditions. The seismic hazard curves are developed using an empirical spectral shape prediction model that is capable of reflecting the characteristics of earthquake records. The collapse probabilities of the prototype steel OCBFs located at the Korean major cities are then evaluated using the risk integral concept. As a result, analysis parameters considerably influence the collapse probabilities of steel OCBFs. The collapse probabilities of taller steel OCBFs exceed the target seismic risk of 1 percent in 50 years, which the introduction of the height limitation of steel OCBFs into the future KBC should be considered.

**Keywords** : risk-targeted, seismic hazard curve, collapse probability, steel ordinary concentrically braced frame

### 1. 서 론

우리나라를 포함한 많은 국가의 건축물 내진설계는 등재 해지반운동(Uniform hazard ground motion)에 대해 구조물이 일정 수준 이상의 성능을 발휘할 수 있는 것을 목표로 삼고 있다. 이와 같은 설계개념을 반영하여 미국의 내진설계기준(ASCE, 2005)에서는 건축물의 내구연한을 50년으로 가정하고 내구연한 동안 2%의 초과 발생확률을 가지는 등재해지반운동, 즉 최대예상지진(Maximum considered earthquake, MCE)에 대해 붕괴방지 수준의 내진성능을 확보해야 함을 내진성능 목표로 제시하고 있다. 또한 이에 해당하는 성능을 발휘할 수

있도록 내진설계 요구조건을 설정하고 있다. 하지만 등재해지반운동에 기반한 내진설계 개념은 다양한 원인에 의해 발생할 수 있는 건축물 구조성능의 불확실성(Uncertainty)을 반영하지 않아 건축물이 붕괴방지라는 목표성능을 만족하더라도 강진에 대하여 동일한 안전율을 확보했다고 단언하기 힘들다. 이런 등재해도 기반의 내진설계의 문제점을 해결하기 위하여, 지진강도를 표현하는 등재해도 뿐만 아니라 구조물의 내진 성능과 각 각의 불확실성을 고려한 지진위험도(Seismic risk)를 고려한 내진설계 개념이 도입될 필요가 있으며, 여기서 구조물의 내진성능은 지진 손상(Seismic damage)의 대표적인 지표로 여겨지는 붕괴확률이 사용될 수 있다(Luco *et al.*, 2007).

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-6490-2763; E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

Received April 8 2017; Revised July 7 2017;

Accepted August 11 2017

©2017 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.

이에 입각하여 미국의 내진설계기준(ASCE, 2010)에서는 구조성능의 불확실성에 기인하는 붕괴확률의 차이를 고려하여 동일한 수준의 목표 위험도를 설정하고 기준의 요구조건에 따라 설계된 건축물이 최대예상지진에 대해 동일한 내진성능(일정한 붕괴확률)을 발휘할 수 있도록 등재해지반운동을 수정하였다. 즉, 구조물의 내구연한 50년 동안 발생할 수 있는 다양한 지진 강도에 대해 붕괴할 확률이 1%를 초과하지 않도록 최대예상지진의 스펙트럼 계수를 수정한 위험도 기반 최대예상지진(Risk-targeted maximum considered earthquake,  $MCE_R$ ) 개념을 도입하였다.

하지만 국내 내진설계기준(KBC, 2016)에서는 한반도에 발생한 강진기록이 충분하지 못하며, 국내 지진재해도(Seismic hazard)를 고려하여 설계된 구조물의 붕괴성능에 대한 상세 연구가 미흡하여 지진위험도에 기반한 내진설계 개념을 반영하고 있지는 않다. 따라서 국내 내진설계기준에 따라 설계된 구조물이 지역에 따라 동일한 수준의 붕괴확률을 확보하고 있는지에 대해서는 의문점이 존재한다. 또한 설계된 구조물이 어떠한 수준의 지진위험도를 보유하고 있는지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 가새의 높은 축방향 강도 및 강성으로 구조물의 횡변위를 효과적으로 제어할 수 있는 지진력 저항시스템인 철골 보통중심가새골조를 대상으로 하여 위험도기반 내진성능을 파악하고자 하였다. Luco 등(2007)에 의해 제시된 위험도 적분법(Risk integral)을 활용하여 구조물의 초과 붕괴확률을 추정하였다. 이를 위하여 국내의 계기지진기록 및 지리학적 부지 특성을 반영하기 위해 스펙트럴 형상 예측 모델과 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA)를 토대로 지진재해도 곡선을 생성하고, 국내 내진설계기준의 설계 요구조건을 고려하여 설계된 표본 철골 보통중심가새골조를 대상으로 증분동적해석(Incremental dynamic analysis, IDA)을 수행하여 구조물의 붕괴취약도 함수를 구하였다. 최종적으로 앞서 결정한 지진재해도 곡선과 붕괴취약도 함수를 활용하여 표본건물에 대한 지진위험도를 평가하였으며 구조물의 생애 주기 동안 최소한의 성능 목표(붕괴확률)를 확보하기 위한 설계요구조건을 검토하였다.

## 2. 지진위험도 평가 방법론

발생특성상 예측이 불가능한 확률적 특성을 가지는 지진에 대해 일정기간 동안 구조물이 붕괴될 확률은 임의의 크기의 지진에 대해 구조물의 붕괴확률을 제시하는 붕괴취약도와 다양한 강도의 지진이 발생할 확률, 즉, 지진재해도를 이용하여 평가할 수 있다. Luco 등(2007)은 위험도 적분을 활용하여 구조물이

건설된 위치에서 발생하는 지반운동의 평균 스펙트럴 가속도의 크기와 변동성을 기반으로 구조물의 초과 붕괴확률을 계산하는 방법을 제시하였다.

지진재해도 곡선은 다양한 지진 강도의 발생확률을 분석한 것으로, 주어진 기간과 장소에서 특정 강도를 가진 지반운동의 초과 발생확률이나 빈도를 지진지체모델과 감쇠식을 사용하여 표현한 것이다. 붕괴취약도는 구조물의 붕괴확률을 의미하는 것으로, 구조물의 내진성능 예측과 관련된 불확실성과 지반운동의 변동성 등 다양한 원인에 의하여 영향을 받는다. 지반운동의 변동성(Record-to-Record variability)은 지진파의 종류 및 과형 등에 기인하며, 구조물의 내진성능과 관련된 불확실성은 시공품질, 재료 물성치, 비구조재 요소 그리고 구조물의 특성과 관련된 다양한 조건의 변동성에 의해 영향을 받는 확률변수이다(Shin and Kim, 2015). 이와 같은 구조물 성능의 불확실성은 불확실성 계수(표준편차)를 이용하여 대수정규분포의 포락곡선을 통해 확률분포로 표현할 수 있다.

구조물의 지진위험도 평가는 대수정규분포의 포락곡선으로 표현되는 구조물 성능의 불확실성과 지진재해도 상에 표현되는 초과확률의 곱을 구조물의 목표 성능 구간에서 적분함으로써 계산할 수 있다. 즉, 식 (1)을 통해 위험도 적분을 수행하여 연간 붕괴확률,  $P[Collapse]$ 을 구할 수 있다.

$$P[Collapse] = \int_0^{\infty} P[SA > c] f_{capacity}(c) dc \quad (1)$$

여기서,  $c$ 는 스펙트럼 가속도로 표현되는 구조물의 성능,  $f_{capacity}(c)$ 는 구조물 성능의 불확실성에 대한 확률밀도함수,  $P[SA > c]$ 는 지진재해도 곡선 상의 연간초과확률로, 구조물의 성능  $c$ 보다 큰 스펙트럼 가속도를 발생시킬 수 있는 지진의 연간초과발생확률이다. 최종적으로  $Y$ 년 동안 구조물의 붕괴 확률  $P[Collapse \text{ in } Y \text{ years}]$ 은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$P[Collapse \text{ in } Y \text{ years}] = 1 - (1 - P[Collapse])^Y \quad (2)$$

여기서,  $1 - P[Collapse]$ 는 일년 동안 지진으로 인한 붕괴가 발생하지 않을 확률이며, 이 확률이  $Y$ 년 동안 연속될 확률은  $(1 - P[Collapse])^Y$ 이다. 건축물의 내구연한을 50년으로 가정한다면, 식 (2)에서  $Y$ 는 50이 되며,  $P[Collapse \text{ in } Y \text{ years}]$ 는 건축물의 내구연한 동안 붕괴가 발생할 확률이 된다.

## 3. 표본건물의 붕괴취약도 평가

### 3.1 표본건물의 설계

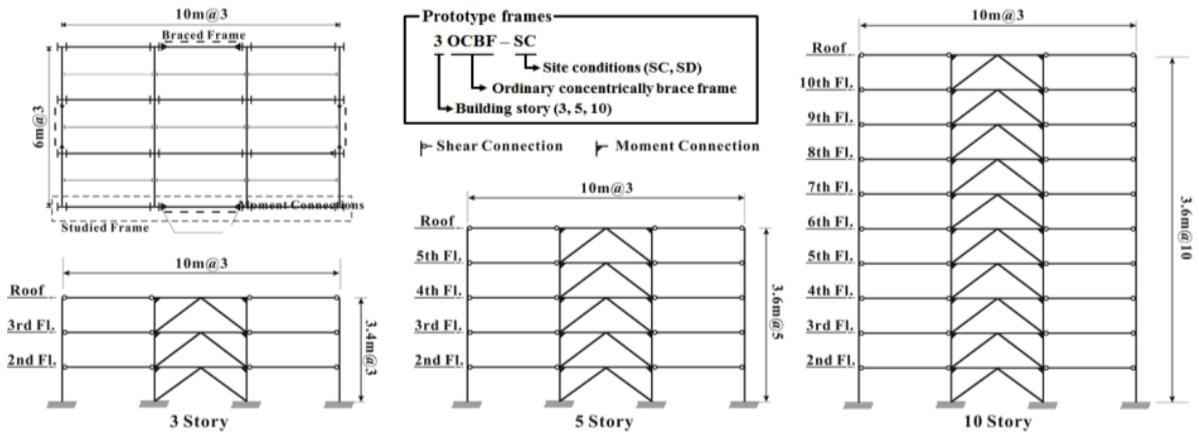


Fig. 1 Configuration of steel ordinary concentrically braced frames(OCBFs)

Table 1 Seismic design parameters of prototype frames

Site	$S_{DS}$	$S_{DI}$	$R$	$\Omega_0$	$C_d$	SDC	OC
SC	0.499	0.287	3.25	2	3.25	D	II
SD	0.433	0.232					

SDC : Seismic design category, OC : Occupancy category

국내 주요 도시별 구조물의 지진위험도를 평가하기 위해서는 앞선 절에서 언급한 바와 같이 대상 구조물의 붕괴취약도가 필요하다. 본 연구에서는 Park(2015)이 연구한 철골 보통중심가새골조를 표본건물(Prototype buildings)로 선정하여 구조물의 붕괴취약도를 도출하였다. 철골 가새골조는 가새의 축방향 저항능력을 이용하여 작은 부재 단면 사이즈로도 효과적으로 횡력에 저항할 수 있는 구조시스템이다. 표본건물은 3, 5 그리고 10층 규모의 직사각형 평면으로 구조적 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 장·단변 방향 모두 세 개의 경간으로 구성되어 있고, 각 경간의 길이는 장변 방향으로 10m, 단변 방향은 6m이다. 각 층의 높이는 3층 건물의 경우에 3.4m이고 5, 10층 건물의 경우 3.6m이다. 횡방향력은 외주 골조의 중앙 경간에 배치된 역 V형 가새가 저항하도록 계획되었으며 본 연구에서는 장변방향 외주 골조를 선택하여 연구를 수행하였다. Table 1에서는 표본건물의 설계에 사용한 내진설계계수를 정리하고 있다. 부재 설계결과 및 하중조건에 대한 상세한 사항은 Park(2015)에 제시되어 있다.

표본건물은 SC 및 SD 지반에 위치하는 것으로 가정하였으며, SD지반에 위치한 표본건물이 국내 내진설계기준 상 내진설계범주 D에 속하는 것으로 파악되었다. 이와 관련하여 미국의 내진설계기준, ASCE 7-10(2010)에서는 내진설계범주 D와 E에 해당하며, 구조물의 총 높이가 10.67m를 초과하는 건축물의 경우 철골 보통중심가새골조를 지진력저항시스템으로 사용할 수 없도록 제한하고 있다. 반면 국내 내진설계기준에서는 내진설계범주에 따른 철골 보통중심가새골조의 높이 제한을 설정하지 않고 있다. 유사한 내진설계 개념을 가진 두 기준에서

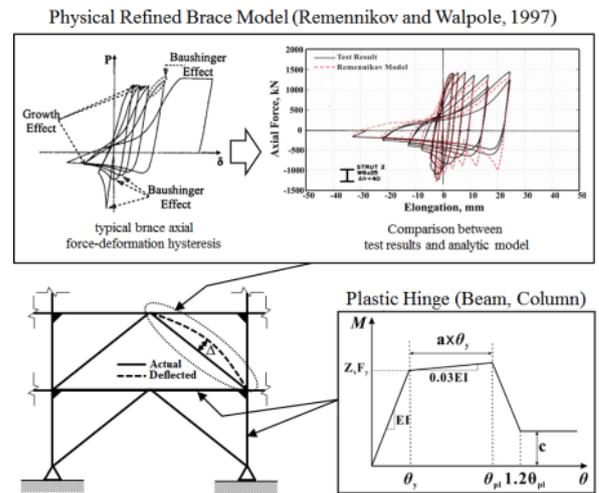


Fig. 2 Hysteretic behavior of structural members

특정 지진력저항시스템에 대하여 다른 설계요조건을 제시한 것에 대해 분석할 필요가 있어, 높이제한이 철골 보통중심가새골조의 지진위험도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 표본건물 중에서는 5, 10층 골조가 ASCE 7-10의 높이 제한을 만족시키지 못하는 경우에 해당한다.

### 3.2 표본건물의 붕괴성능

구조물의 붕괴성능이 불확실성을 내포하지 않은 결정론적 변수이면 하나의 고정된 수치로 표현이 가능하나, 앞서 언급한 것처럼 불확실성을 가진 확률론적 변수이기 때문에 평균과 표준편차를 통한 확률분포로 모델링하는 것이 요구된다. 구조물의 붕괴성능과 관련된 불확실성 중 지반운동의 변동성은 일반적으로 증분동적해석(Incremental dynamic analysis, IDA) 절차를 이용하여 평가될 수 있다(Vamvasikos and Cornell, 2002). 증분동적해석에서는 구조물의 응답이 탄성에서 붕괴가 발생할 때까지 지반가속도를 증가시키며 비선형

동적해석을 반복 수행하게 된다. 해석결과의 대표응답을 토대로 붕괴취약도 곡선을 작성하여 요구붕괴성능에 대한 통계적 수치를 획득할 수 있다.

중분동적해석을 수행하기 위한 표본건물의 모델링은 Ruau-moko-2D(Carr, 2009)를 사용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 보와 기둥의 이력거동은 이선형 모델을 사용하였으며, 부재의 연성능력은 FEMA 356(2000)의 연성도 평가방법을 사용하여 결정하였다. 접합부 형식은 완전강접형식으로 “Welded Flange-Bolted Web”에 대응되는 연성도를 고려하였다. 가새 부재는 Remennikov and Walpole(1997)에 의해 제안된 가새 모델(Refined physical brace model)을 적용하여 슬립현상 및 사이클에 따른 압축강도의 감소를 모델링하였다.

구조물의 지진응답을 평가하기 위해서 사용되는 지반운동은 FEMA P695(2009)에서 제시하고 있는 원단층 지반운동 데이터 중 20쌍(총 40개)의 지진파를 사용하였다. Table 2에서는 본 연구에서 사용된 지진파의 정보를 제시하고 있다. 해석과정에서 동적 불안정으로 과도한 횡변위 발생 후 P- $\Delta$  효과에 의해서 스펙트럴 가속도의 증가가 없는 상태에서도 최대 층간변위각이 지속적으로 증가하기 시작하는 지점을 구조물 붕괴로 정의하였다. 이는 IDA 그래프 곡선이 초기 기울기의 20%가 되는 지점이다.

Table 2 List of far-field ground motions

No	Earthquake	Station	PGA(g)	
			Comp. 1	Comp. 2
1	Northridge	Beverly hills - mulhol	0.416	0.516
2	Northridge	Canyon country-WLC	0.410	0.482
3	Duze, Turkey	Bolu	0.728	0.822
4	Hector mine	Hector	0.266	0.337
5	Imperial valley	Delta	0.238	0.351
6	Imperial valley	El centro array #11	0.364	0.380
7	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0.509	0.503
8	Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.243	0.212
9	Kocaeli, Turkey	Duzce	0.312	0.358
10	Kocaeli, Turkey	Arcelik	0.218	0.149
11	Landers	Yermo fire station	0.245	0.152
12	Landers	Coolwater	0.283	0.417
13	Loma prieta	Capitola	0.529	0.443
14	Loma prieta	Gilroy array #3	0.555	0.367
15	Superstition hills	El centro imp.Co.	0.358	0.258
16	Superstition hills	Poe road(temp)	0.446	0.300
17	Cape mendocino	Rio dell overpass	0.385	0.549
18	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	0.353	0.440
19	San fernando	LA-Hollywood stor	0.210	0.174
20	Friuli, Italy	Tolmezzo	0.351	0.315

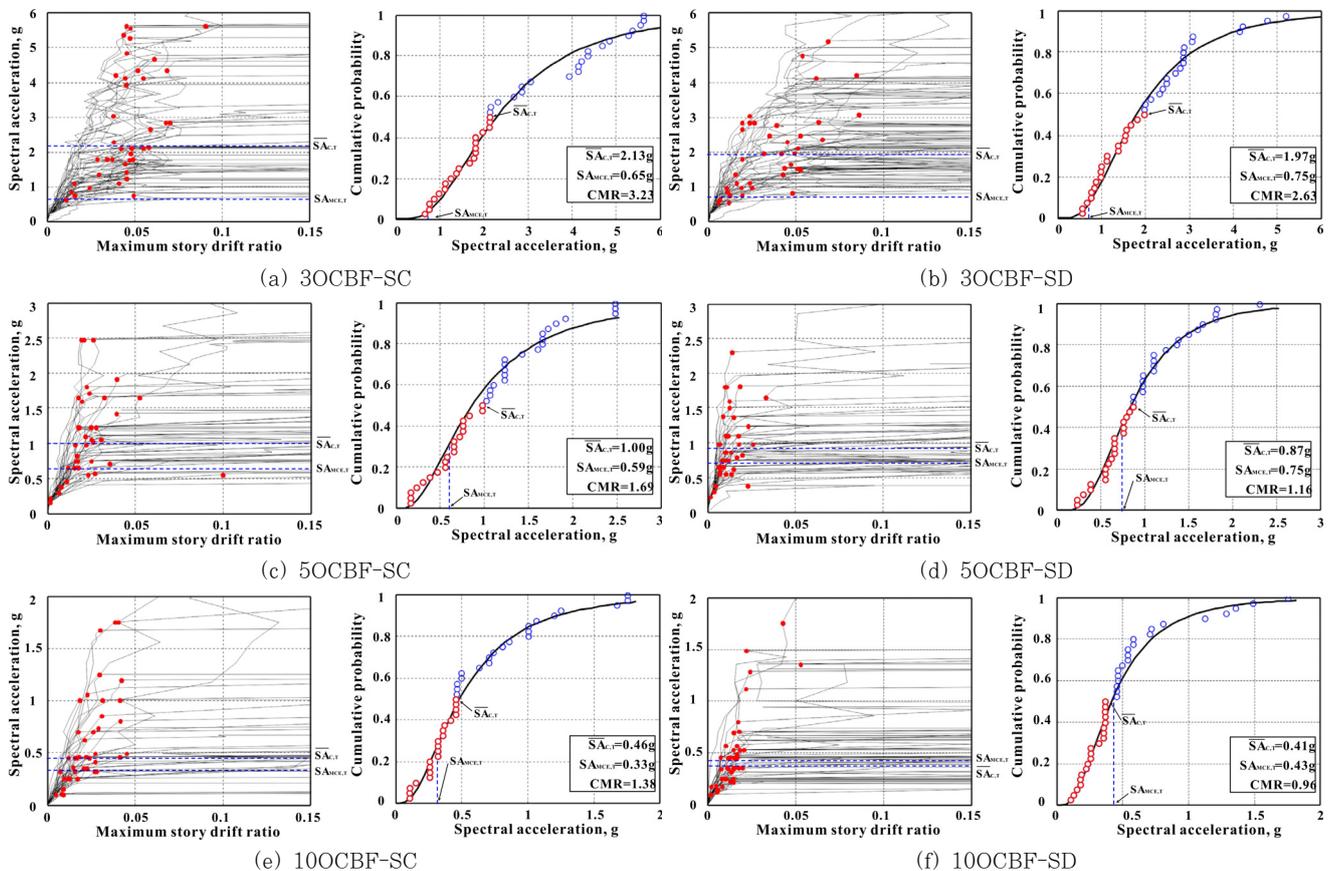


Fig. 3 Collapse fragility curves of prototype frames obtained from IDAs

Fig. 3에서는 표본건물에 대한 IDA 해석결과와 붕괴점에 대한 누적확률분포로 정의되는 붕괴취약도 함수를 제시하고 있다. IDA 해석결과를 바탕으로 구조물 붕괴성능의 척도가 되는 붕괴여유비(Collapse margin ratio, CMR)를 산정하였다. 붕괴여유비는 붕괴성능의 중간값,  $\overline{SA_{C,T}}$ 과 최대예상지진의 스펙트럴 가속도,  $SA_{MCE,T}$ 의 비로 결정된다. 본 연구에서 활용한 붕괴성능의 중간값은 총 40개의 시뮬레이션 결과에서 붕괴가 발생하는 결과수가 20개일 때의 스펙트럴 가속도 값이며, 최대예상지진의 스펙트럴 가속도는 구조물의 약산주기에 대응되는 2400년 재현주기 지진의 스펙트럴 가속도로 정의된다. 3층 표본건물의 경우 2.5이상의 붕괴여유비를 나타내어 해석에 고려된 대부분의 경우가  $SA_{MCE,T}$ 보다 높은 스펙트럴 가속도에서 붕괴가 발생함을 확인할 수 있다. 반면 층고가 높아질수록 표본건물의 붕괴여유비는 급격히 감소했으며, 특히 50%의 이상의 붕괴점이  $SA_{MCE,T}$ 보다 낮게 형성된 SD지반에 위치한 10층 표본건물은  $\overline{SA_{C,T}}$ 가  $SA_{MCE,T}$ 보다 작았다. 뿐만 아니라 동일한 층고의 표본건물일 경우에 SC지반보다 SD지반조건에서 붕괴여유비가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 구조물 붕괴성능의 확률분포를 작성하기 위해 요구되는 확률변수를 정리한 것이다. 지반운동의 변동성으로 인한 구조물 붕괴성능의 불확실성,  $\beta_{AU}$ 는 IDA해석결과 획득된 붕괴점 분포가 대수정규분포를 따른다는 가정에 따라 결정된 대수표준편차이다. 붕괴점 분포의 변동계수는 평균값과 표준편차의 비로 정의되며, 이를 토대로 표본건물의 유형에 따른 붕괴여유율의 변화를 분석하였다. 고려한 표본건물은 0.6~

**Table 3** Statistical parameters determining probabilistic distribution of collapse capacities

Prototype frame	$SA_{Medium}, g$	$\beta_{AU}(COV)$	$\beta_{TOT}$
3OCBF-SC	2.13	0.628 (0.295)	0.824
3OCBF-SD	1.97	0.636 (0.323)	0.839
5OCBF-SC	1.00	0.729 (0.729)	0.904
5OCBF-SD	0.87	0.550 (0.632)	0.766
10OCBF-SC	0.46	0.728 (1.583)	0.902
10OCBF-SD	0.41	0.656 (1.600)	0.846

\* COV : Coefficient of variation  
(=standard deviation/mean)

**Table 4** Average peak ground accelerations along with return periods(unit : g)

Return period, year	Seoul	Chuncheon	Cheongju	Daejeon	Jeonju	Gwangju	Daegu	Busan	Ulsan
50	0.028	0.020	0.031	0.031	0.027	0.027	0.029	0.028	0.035
100	0.042	0.029	0.044	0.044	0.040	0.040	0.044	0.041	0.050
250	0.056	0.041	0.060	0.061	0.057	0.057	0.060	0.057	0.070
500	0.085	0.065	0.087	0.087	0.083	0.083	0.086	0.085	0.095
1000	0.114	0.087	0.123	0.123	0.119	0.118	0.124	0.118	0.125
2400	0.170	0.130	0.181	0.183	0.177	0.175	0.181	0.175	0.180
4800	0.227	0.217	0.239	0.240	0.234	0.235	0.241	0.233	0.230

0.7 범위의 유사한 표준편차를 나타내었으나, 표본건물의 층고가 높아질수록 붕괴점 스펙트럴 가속도의 평균값이 낮아지는 영향으로 인해 변동계수가 큰 수치로 평가되었다.

지반운동의 변동성 이외에 구조물 붕괴성능의 확률분포에 영향을 미치는 요인들을 FEMA P-695(2009)에 근거하여 다음과 같이 고려하였다.

- 1) 설계요구조건외의 정교함과 관련된 불확실성,  $\beta_{DR}$
- 2) 실험데이터의 정확함과 관련된 불확실성,  $\beta_{TD}$
- 3) 해석모델이 표본건물의 응답특성을 얼마나 잘 반영하는지와 관련된 불확실성,  $\beta_{MDL}$

우선  $\beta_{DR}$ 은 철골 보통중심가새골조가 새로 제안된 시스템이 아닌 오랜 기간 검증되어온 시스템이므로 'Good( $\beta_{DR}=0.2$ )'으로 고려하였다.  $\beta_{TD}$ 는 보, 기둥부재에 비해 해석모델에 적용한 가새부재의 실험데이터가 제한적이므로 'Fair( $\beta_{TD}=0.35$ )'로 고려하였다.  $\beta_{MDL}$ 은 P-delta효과, 가새의 압축 좌굴 및 구조부재의 강도저감 등 표본건물의 동적거동을 정확히 모사하였으나, 가새의 저주기 피로파괴 등은 반영되지 않았으므로 'Fair( $\beta_{MDL}=0.35$ )'로 산정하였다. 최종적으로 앞서 결정된 불확실성 계수들을 제곱합-제곱근 방법을 통해 조합하여 구조물 붕괴성능의 불확실성  $\beta_{TOT}$ 을 Table 3에 제시하였다.

#### 4. 지진재해도 곡선

Cornell(1968)에 의해 제안된 지진재해도 분석은 하나 또는 그 이상의 부지에 대하여 발생 가능한 지진의 거리와 규모에 대한 모델을 확률론적으로 조합하는 방법으로서 고려한 지진 지체모델과 감쇠식에 따라 다양한 해석이 가능하다. 다수의 연구에서 국내 지진재해도를 작성하기 위한 확률론적 분석이 수행되었으며, 본 연구에서는 대표적으로 국토교통부(1997), 한국원자력연구원(2012), 한국지질자원연구원(2012), 소방방재청(2013)의 연구결과를 활용하였다. 연구수행주체에 따라 상이한 지진의 재현주기별 최대지반가속도로 제시하고 있으며 이를 내진설계 지도(Seismic design map)의 형태로 표현하였다. 각 연구별로 적용한 지진지체모델 및 감쇠식에 따른

Table 5 Estimator coefficients of the empirical shape prediction model

$I(M, R, V_{s30})$				$\mu(M, R, V_{s30})$				$S(M, R, V_{s30})$				$T_{sp}(M, R, V_{s30})$			
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$
0.400	$8.5 \times 10^{-4}$	$-2.5 \times 10^{-4}$	0.893	-0.307	$-1.3 \times 10^{-3}$	$-6.7 \times 10^{-5}$	3.575	0.076	$4.9 \times 10^{-5}$	$7.9 \times 10^{-5}$	0.255	0.079	$-5.7 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-4}$	-0.061

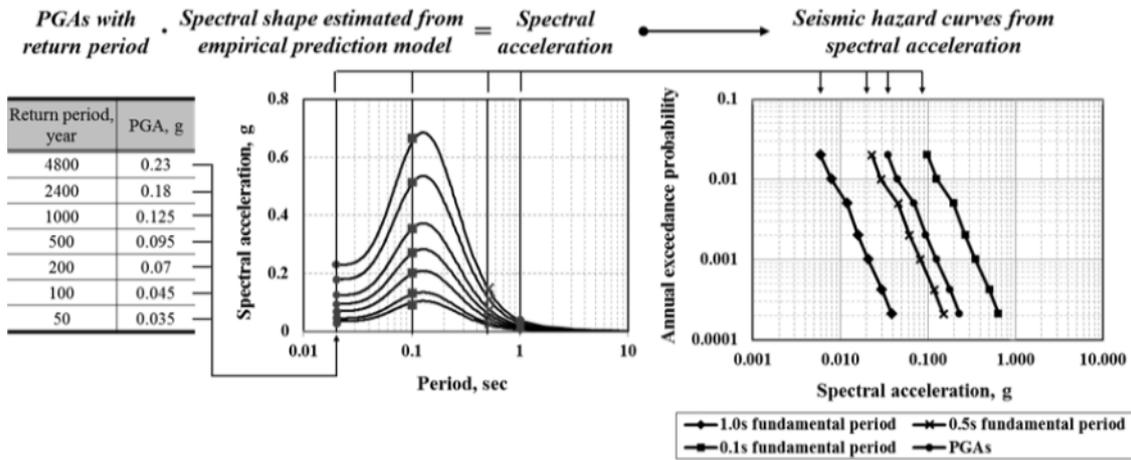


Fig. 4 Procedure for developing the seismic hazard curves

결과의 편차를 줄이고자 평균 최대지반가속도 값을 고려하였다. 국내 9개 주요도시(서울, 춘천, 청주, 대전, 전주, 광주, 대구, 부산, 울산)에 대한 재현주기별 평균 최대지반가속도를 Table 4에 정리하였다.

표본건물의 지진위험도를 평가하기 위해서는 Table 4에 제시된 최대지반가속도 값이 아닌 표본건물의 기본주기에 해당하는 스펙트럴 가속도(Spectral acceleration) 값이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Shin 등(2016)에서 제시한 경험적 스펙트럴 형상 예측모델(Empirical spectral shape prediction model)을 활용하여 표본건물의 고유주기에 대응되는 스펙트럴 가속도에 근거한 지진재해도 곡선을 작성하였다.

Shin 등(2016)에서는 국내 최근 20년간 1404개의 지진 기록 및 지반특성을 고려하여 스펙트럴 형상 예측 모델을 제시하였다. 이를 위해 국내 지진기록의 관측자료로 부터 가속도 응답스펙트럼의 형상을 결정하는 변수들을 1) 스펙트럴 형상의 최대값,  $I$ , 2) 스펙트럴 형상의 최대값이 나타나는 주기(지배 주기),  $\mu$ , 3) 스펙트럴 형상의 폭,  $S$ , 4) 최대값 이후(Post-peak) 그래프 기울기의 변곡점 위치,  $T_{sp}$  등 총 4가지로 분류하였다. 스펙트럴 형상은 지반운동 특성에 영향을 받아 변동하게 되므로 그래프 형상을 결정하는 변수들( $I, \mu, S, T_{sp}$ )에 대해 지반운동 특성을 대표하는 변수들을 매개변수로 고려하여 하위 함수를 작성하였다. 여기서, 지반운동을 대표하는 변수들은 1) 지진규모,  $M$ , 2) 진앙거리,  $R$ , 3) 전단파 속도,  $V_{s30}$ 이며, 최종적으로 결정된 스펙트럴 형상 예측모델은 다음의 식,  $SA_{norm}(T)$ 와 같다.

$$SA_{norm}(T) = I(M, R) e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(T) + \mu(M, R, V_{s30})}{S(M, R)} \right)^2} + \left[ (1 + (T/T_{sp})^\zeta)^2 + 4D_{sp}^2 (T/T_{sp}) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

식 (3)에서  $D_{sp}$ 와  $\zeta$ 는 각각 최대값 이후 감쇠정도, 장주기에서 스펙트럴 형상의 감쇠정도를 나타낸다. 이 때 그래프 형상을 결정하는 변수들과 지반운동을 대표하는 변수들 간의 선형 상관관계를 고려하여 하위함수를 다음과 같이 결정하였다.

$$I(M, R, V_{s30}) = a_1 M + a_2 R + a_3 V_{s30} + a_4 \quad (4)$$

$$\mu(M, R, V_{s30}) = m_1 M + m_2 R + m_3 V_{s30} + m_4 \quad (5)$$

$$S(M, R, V_{s30}) = s_1 M + s_2 R + s_3 V_{s30} + s_4 \quad (6)$$

$$T_{sp}(M, R, V_{s30}) = t_1 R + t_2 M + t_3 V_{s30} + t_4 \quad (7)$$

여기서,  $a_1 \sim a_4, m_1 \sim m_4, s_1 \sim s_4, t_1 \sim t_4$ 는 하위함수와 실제값 과의 오차를 최소화하는 예측계수(Estimator coefficient)이며, Table 5에 이를 정리하였다. Shin 등(2016)의 연구에서는 국내 지반의 전단파 속도에 대한 자료조사에서 Matsuoka와 Midorikawa(1993)의 경험식을 사용하였으나 본 연구에서는 이를 개선하고자 국내 주요 지역에 대한 시추공 정보에 근거하여 전단파 속도를 산정하였다.

Fig. 4에서는 울산지역에 대하여 구조물의 주기가 0.1, 0.5, 1.0초일 때의 스펙트럴 가속도 및 최대지반가속도를 활용하여 지진재해도 곡선을 작성하는 과정을 예시적으로 정리하고 있다. 작성과정을 정리하면 다음과 같다. 1) 예측모델

로부터 국내 주요 도시의 부지 및 지진기록 특성을 반영한 스펙트럴 형상(주기에 따른 가속도 스펙트럼의 변화 경향이 최대지반가속도에 대해서 정규화된 값)을 작성하고, 2) 이를 재현주기별 최대지반가속도에 곱하여 재현주기별 표본건물의 스펙트럴 가속도를 산정한다. 3) 결정한 스펙트럴 가속도와 함께 재현주기의 역수를 토대로 연간 초과확률을 근사적으로 산정하여 지진재해도 곡선을 작성한다. 이와 같은 방법론에 따라서 국내 주요 9개 도시에 대하여 경험적 스펙트럴 형상 예측모델에 근거한 지진재해도 곡선을 작성하였다. 이 때, 고려되는 표본건물의 기본주기는 3, 5, 10층 철골 보통모멘트 골조에 대해서 각각 0.27, 0.43, 0.72초이며, 지반조건은 SC, SD의 2가지 유형이다.

### 5. 표본건물의 지진위험도 평가

본 장에서는 표본건물의 생애주기인 50년간 붕괴확률로서 지진위험도를 평가하였다. 이를 위해 앞선 장에서 결정한 국내 주요 도시의 지진재해도 곡선과 표본건물의 붕괴취약도 곡선을 활용하여 위험도 적분을 수행하였다. Fig. 5에서는 지진위험도 평가과정 및 결과를 제시하고 있다. 그림에서는 국내 주요 도시 중에서 지진재해도가 가장 큰 울산지역, 가장 작은 춘천지역 그리고 평균값을 나타내는 서울지역에 위치한 표본골조의 지진 위험도를 도시하였다. 그림의 첫 단에 위치한 그래프는 연간 초과확률의 개념을 내포한 지진재해도 곡선이며, 중간 단에 위치한 그래프는 구조물의 붕괴성능을 나타낸다. 마지막으로

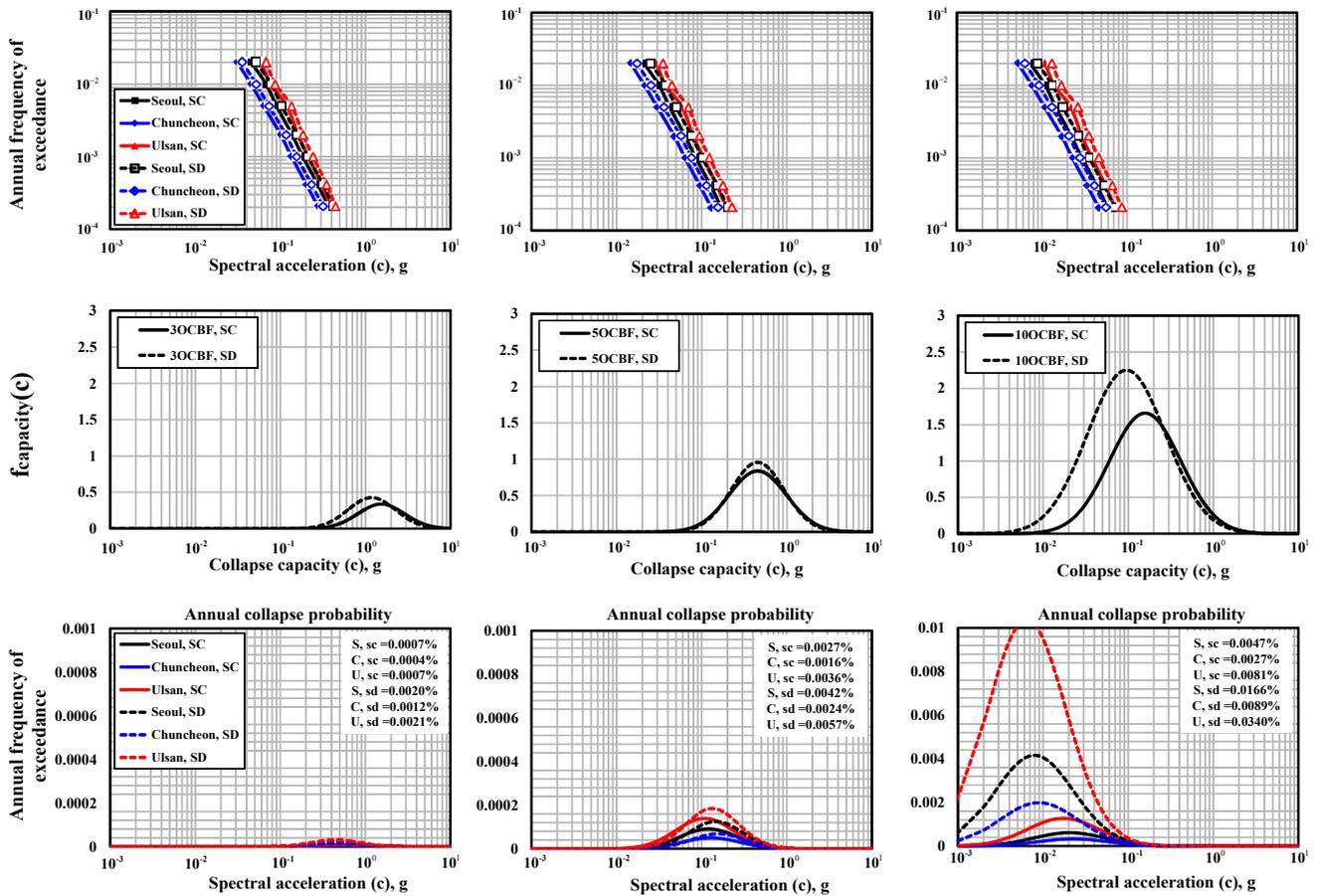


Fig. 5 Annual collapse probabilities of prototype frames located at 3 cities(Seoul, Chuncheon and Ulsan)

Table 6 50 years collapse probabilities of the prototype frames located at the Korean 9 major cities(unit : %)

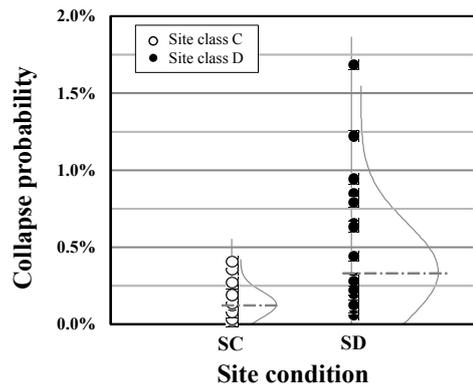
Prototype	Seoul	Chuncheon	Cheongju	Daejeon	Jeonju	Gwangju	Daegu	Busan	Ulsan
3OCBF-SC	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03
3OCBF-SD	0.10	0.06	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.13	0.11
5OCBF-SC	0.14	0.08	0.13	0.13	0.12	0.12	0.14	0.20	0.18
5OCBF-SD	0.21	0.12	0.21	0.20	0.20	0.19	0.22	0.30	0.28
10OCBF-SC	0.23	0.14	0.24	0.22	0.20	0.19	0.27	0.36	0.41
10OCBF-SD	0.83	0.45	0.85	0.80	0.66	0.63	0.94	1.22	1.69

가장 하단에 위치한 그래프는 그래프 첫 단과 중간 단에 위치한 그래프의 곱을 통해 획득되는 것으로서 구조물 붕괴성능에 대한 확률밀도함수와 연간초과확률의 곱으로 표현되는 함수  $f(c) = P[SA > c]f_{capacity}(c)$ 를 의미한다. 따라서 마지막 그래프 곡선의 하단면적을 바탕으로 구조물의 연간 붕괴확률을 산출할 수 있다. 이 때, 지진재해도 곡선의 x축 범위 이상의 값은 지수함수 형태의 추세식을 통해 외삽하였다. 국내 9개 주요 도시에 대한 표본골조의 지진위험도 평가결과를 Table 6에 정리하였다.

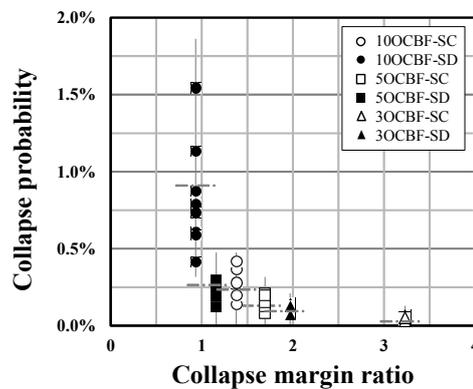
일반적으로 지진재해도가 큰 지역에서 50년간 붕괴확률이 커지는 경향이 나타났다. 보다 상세하게 주요 도시별 지진위험도를 비교하면, Table 4에서 최대지반가속도로 표현되는 지진재해도가 유사한 지역인 청주와 대전, 전주와 광주에 위치한 표본골조는 지반의 유형이 동일할 경우에 유사한 50년간 붕괴확률을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 지진재해도가 유사한 부산과 광주는 50년간 붕괴확률에 있어 상당한 차이가 발생하였다. 이는 부산지역이 광주지역에 비해 계기지진의 진앙거리가 가깝게 분포하고, 지진규모도 큰 경향으로 인해 예측된 가속도 스펙트럼도 크게 나타났기 때문이다. 즉, 부산지역이 광주지역에 비해 경험적 스펙트럴 형상 모델로 스펙트럼 형상을 예측할 때에 그 값을 크게 평가했음을 의미한다.

Fig. 6(a)에서는 지반종류에 따른 50년간 붕괴확률의 평가 결과를 정리하고 있다. SD지반에 위치한 표본건물이 SC지반에 위치한 표본건물보다 높은 붕괴확률을 보였으며, 평균적으로 SD지반은 0.40%, SC지반은 0.14%의 50년간 붕괴확률을 나타내었다. 지반조건에 따른 50년간 붕괴확률은 SC지반과 SD지반에 대해서 각각 0.13, 0.87의 변동계수를 가지는 것으로 평가되었으며, SD지반에 위치한 표본건물의 붕괴확률이 더 큰 변동성을 나타내었다. 이는 부지 증폭효과로 인해 SD지반의 지진재해도가 SC지반보다 클 뿐만 아니라(Fig. 5 상단), SD지반에 위치한 표본건물 붕괴성능의 하단면적이 SC지반에 비해 크게 나타났기 때문이다(Fig. 5 중간단). 따라서 지진재해도 곡선과 구조물 붕괴성능을 나타내는 확률밀도함수의 위험도적분 구간이 폭 넓은 스펙트럴 가속도 범위에서 형성되고 결과적으로 그래프의 하단면적이 증가해 50년간 붕괴확률이 커지게 된다(Fig. 5 하단).

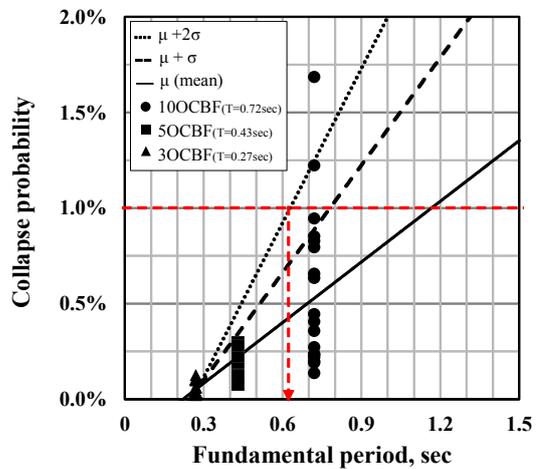
건물의 높이는 구조물의 기본 주기와 밀접한 관련이 있다는 점에서 구조물의 붕괴확률에 영향을 미치는 주요 요소이다. IDA 해석결과로 획득된 붕괴여유비와 50년간 붕괴확률의 관계를 Fig. 6(b)에 의하면, 붕괴여유비가 커짐에 따라 50년간 붕괴확률은 감소했으며 산포도도 감소하는 것으로 나타났다. 붕괴여유비가 1.0이상이면 50년간 붕괴확률은 평균적으로 0.25%이하로 평가되었으나 붕괴여유비가 1.0이하가 되면



(a) Correlation between collapse probabilities and site conditions



(b) Correlation of collapse probabilities with CMRs



(c) Correlation of collapse probabilities with fundamental periods related to building heights

Fig. 6 Correlations of collapse probabilities with important parameters

평균적으로 0.88%의 붕괴확률로 수치가 급격히 증가하였다. 이와 같이 붕괴여유비가 1.0이하로 평가되는 경우는 표본건물의 높이와 지반 조건이 주요 원인임을 그림을 통하여 알 수 있다. 국내 내진설계기준에 의해 설계된 철골 보통모멘트골조의 높이 제한 필요성에 대해 보다 효과적으로 언급하기 위하여 Fig. 6(c)에서 50년간 붕괴확률과 표본건물 기본주기의 상관관계를

도시하였다. 그림에는 기본주기의 변화에 따른 50년간 붕괴 확률의 경향을 확인하기 위해 붕괴확률분포의 평균값( $\mu$ ), 평균값+1·표준편차( $\mu+\sigma$ ), 평균값+2·표준편차( $\mu+2\sigma$ )를 함께 표시하였다. 지진위험도의 개념을 반영한 미국의 내진 설계기준(ASCE, 2010)에서는 목표 위험도의 기준을 1%로 설정하고 있으며, 이를 참고하여 본 연구의 지진위험도 평가결과를 비교하였다. 3, 5, 10층 표본건물의 기본주기는 0.27, 0.43, 0.72초이며 이에 대응되는 50년간 붕괴확률은 각각 평균값으로 0.07, 0.2, 0.6%이다. 표본건물의 기본주기가 커질수록, 즉 표본건물의 높이가 높아질수록 평균 50년간 붕괴확률은 선형적으로 증가하였다. 따라서 평균 50년간 붕괴 확률의 증가 경향을 고려하면 표본구조물의 주기가 약 1.2초 정도에서 미국 내진설계기준의 목표 위험도 1%와 유사한 50년간 붕괴확률을 보일 것으로 판단된다.

Fig. 6(c)에서 1%의 목표 위험도를 초과하는 경우는 국내에서 비교적 지진재해도가 높은 부산과 울산지역의 SD지반에 위치한 10층 표본건물로서 각각 1.22와 1.69%의 50년간 붕괴확률을 나타내었다. 이와 같이 국내의 지진재해도가 높은 지역까지 반영하기 위해서는  $\mu+\sigma$ ,  $\mu+2\sigma$ 의 범위까지 50년간 붕괴확률의 분포범위를 고려해야 한다. 표본건물의 기본주기가 증가함에 따라서 붕괴확률의 산포도가 증가하기 때문에  $\mu$ 의 경우와 비교하여  $\mu+\sigma$ ,  $\mu+2\sigma$ 의 경우에 기본주기 증가에 따라 붕괴확률이 가파르게 상승하였다.  $\mu+\sigma$ ,  $\mu+2\sigma$ 의 경우에 각각 약 0.8초, 0.6초 주기범위에서 목표위험도 수준의 50년간 붕괴확률로 평가되었다. 따라서 내진설계범주 D 혹은 E로 분류되는 철골 보통중심가새골조를 대상으로 목표위험도인 50년간 1%의 붕괴확률을 만족하기 위해서는 높이제한에 대한 고려가 필요하며, 이를 고려함에 따라 국내 내진설계기준에 따라 설계된 중·고층 철골 보통중심가새골조의 부족한 내진성능 발휘를 제한할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 국내 내진설계기준에 따라 설계된 철골 보통 중심가새골조에 대한 지진위험도를 평가하였으며, 구조물 생애 주기 동안 최소한의 성능 목표를 확보하기 위한 설계요구조건을 검토하였다. 이를 위해 건축물의 위치, 높이 그리고 지반조건을 주요 변수로 고려하였다. 지진위험도를 평가하기 위해 요구되는 국내 지진재해도 곡선을 재현주기별 최대지반가속도와 경험적 스펙트럴 형상 예측 모델을 활용하여 도출하였으며, 표본건물에 대한 중분동적해석을 수행하여 붕괴취약도 곡선을 도출하였다. 이를 바탕으로 위험도 적분을 수행하여 철골 보통중심가새골조의 위험도기반 내진성능 평가를 수행하였으며 다음과 같은

결론을 얻었다.

- 1) 지진재해도가 큰 지역일수록 50년간 붕괴확률도 증가하는 경향을 보였으며, 유사한 재현주기별 최대지반가속도를 가지는 지역이더라도 경험적 스펙트럴 형상 예측식을 통해 예측된 스펙트럴 가속도가 큰 지역의 50년간 붕괴 확률이 크게 평가되었다.
- 2) 표본건물의 50년간 붕괴확률은 내진성능, 지반조건, 구조물의 높이에 영향을 받는 붕괴여유비가 감소할수록, 즉 표본건물이 높아지고 대상 건물이 SD지반에 위치할수록 증가하였다.
- 3) 50년간 1%의 붕괴확률을 목표 위험도로 설정하면, 국내 9개 주요도시 중에서 지진위험도가 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 울산과 부산지역의 SD지반에 위치한 10층 표본건물은 목표 위험도를 초과하는 것으로 나타났다.
- 4) 목표위험도인 50년간 1%의 붕괴확률을 만족시키기 위하여 ASCE 7-10에서 제안하고 있는 내진설계범주 D 및 E에 해당하는 구조물의 높이제한을 도입하는 것이 철골 보통중심가새골조의 내진성능 향상에 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

## References

- Architectural Institute of Korea** (2016) *Korean Building Code, KBC2016*, Architectural Institute of Korea, Seoul.
- ASCE/SEI 7-05** (2005) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Virginia, U.S.A.
- ASCE/SEI 7-10** (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Virginia, U.S.A.
- Carr, A.J.** (2009) *RUAUMOKO-2D, Computer Program Library*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Cornell, C.A.** (1968) Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seismol. Soc. America*, 58(5), pp.1583~1606.
- FEMA 356** (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., U.S.A.
- FEMA P-695** (2009) *Quantification of Buildings*

- Seismic Performance Factors*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., U.S.A.
- KAERI** (2012) Probabilistic Seismic Hazard Analysis Procedure and Application for Nuclear Power Plant Sites, Report. No. KAERI/TR-4633, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea.
- KIGMR** (2012) *Active Fault Map and Seismic Hazard Map*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea.
- Luco, N., Ellingwood, B.R., Hamburger, R.O., Hooper, J.D., Kimball, J.K., Kircher, C.A.** (2007) Risk-Targeted Versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States, *Structural Engineers Association for California 2007 Convention Proceedings*, pp.163~175.
- Matsuoka, M., Midorikawa, S.** (1993) Empirical Estimation of Average Shear-wave Velocity of Ground using the Digital National Land Information, *J. Struct. & Constr.*, 443, pp.65~71.
- MLIT** (1997) *Study on Seismic Design Code Enhancing Seismic Performance*, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation in Korea, Seoul, Korea.
- NEMA** (2013) *Seismic Hazard Map of Korea*, National Emergency Management Agency in Korea, Seoul, Korea.
- Park, J.Y.** (2015) Evaluation of Seismic Collapse Capacity of Steel Ordinary Concentrically Braced Frames, Master thesis, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Remennikov, A.M., Walpole, W.R.** (1997) Modeling the Inelastic Cyclic Behaviour of A Bracing Member for Work Hardening Material, *Int. J. Solids Struct.*, 34(27), pp.3491~3515.
- Shin, D.H., Hong, S.J., Kim, H.J.** (2016) Prediction of Spectral Acceleration Response Based on the Statistical Analyses of Earthquake Records in Korea, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 20(1), pp.45~54.
- Shin, D.H., Kim, H.J.** (2015) Domestic Seismic Design Maps Based on Risk-Targeted Maximum-Considered Earthquakes, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 19(3), pp.93~102.
- Vamvasikos, D., Cornell, C.A.** (2002) Incremental Dynamic Analysis, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 31, pp.491~514.

## 요 지

미국의 내진설계기준인 ASCE/SEI 7-10은 구조물 붕괴성능에 대한 불확실성을 고려하지 않는 등재해도 기반 내진설계의 문제점을 해결하기 위해 위험도 기반 내진설계 개념을 도입하였다. 하지만 현행 국내 내진설계기준의 경우 한반도 내에서 발생한 큰 규모의 지진기록과 구조물의 붕괴성능과 관련된 연구의 부족으로 위험도 기반 내진설계 개념을 반영하지 않고 있다. 본 연구에서는 철골 보통중심가새골조를 표본건물로 선정하여 위험도 기반 내진성능평가를 수행하였다. 건물이 위치한 지역, 높이, 지반조건을 변수로 바탕으로 표본건물에 대한 붕괴성능 평가를 수행하였으며, 국내 지진기록의 특성을 반영할 수 있는 경험적 스펙트럴 형상 예측 모델을 활용하여 지진재해도 곡선을 작성하였다. 이를 활용하여 국내 주요 도시에 위치한 철골 보통중심가새골조의 붕괴확률을 위험도 적분 개념에 따라 평가하였다. 국내 주요 도시에 위치한 철골 보통중심가새골조의 붕괴확률을 평가한 결과, 현행 건축구조기준에 따라 설계된 표본건물은 본 연구에서 고려한 해석 변수에 따라 붕괴확률에 상당한 차이를 보였다. 특히 국내 건축구조기준의 경우 철골 보통중심가새골조에 대한 높이제한이 없어 일부 고층 표본건물에서 목표 위험도인 50년간 1%의 붕괴확률을 초과하는 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : 위험도 기반, 지진재해도 곡선, 붕괴확률, 철골 보통중심가새골조