

지진 위험도범주 II와 IV로 설계된 철골모멘트골조 건물의 지진 위험도 평가

황성훈¹ · 전종수² · 박태영³ · 이상열^{4*}

¹연구조교수, 한양대학교, 건설환경공학과, ²조교수, 한양대학교, 건설환경공학과,

³석사과정, 안동대학교, 지진방재공학과, ⁴교수, 안동대학교, 토목공학과

Seismic Risk Assessment of Steel Moment Frame Buildings Designed for Risk Categories II and IV

Hwang, Seong-Hoon¹, Jeon, Jong-Su², Park, Taeyoung³, Lee, Sang-Youl^{4*}

¹Research Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

³M.S. Student, Dept. of Earthquake Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 36729, Korea

Abstract - During and after natural disasters, the primary objectives of our society are to achieve the protection of life and to preserve the quality of life such that the continuous functionality of our built environment can be achieved. The critical buildings should be able to play an important role with limited damage for civil protection following the natural hazards. This paper evaluates seismic risks in steel buildings classified as higher risk categories. The collapse risk of the archetype buildings may be of fundamental concern. Repair to nonstructural components is the most significant contributor to the financial losses in critical buildings.

Keywords - Steel moment frames, Risk category, Collapse risk, Financial loss assessment, Seismic effect

1. 서론

1990년대 이후 건축물의 내진설계기준은 상당한 개선이 이루어졌으며, 이는 최근 발생한 큰 규모의 지진에도 붕괴된 건축물의 수가 극히 적었던 점과 신축 혹은 내진보강된 건물의 향상된 내진성능을 보였던 점 등에서 확인할 수 있다^{[1]-[3]}. 하지만 재래공법 건축물의 경우 지진 발생시 인명보호의 내진성능목표는 만족하지만, 지진에 의해 심각한 직·간접적 경제적 손실이 여전히 발생했다^[4]. 이러한 문제는 지

진재난 발생 후 지진복원력을 갖춘 지역사회의 구현을 위해서는 지진재난으로 발생한 건물의 경제적 손실이 반드시 해결해야 하는 중요한 선결 과제를 시사한다^[5].

자연재해 발생 후 재난 대처와 재해 복구에 필수적인 중요 건물(병원, 소방서, 재난방재센터, 대피소, 관공서 등)은 지역사회의 지진복원력에 있어서 중요한 역할을 한다. 따라서 중요 건물(내진등급이 높은 건물)로 분류된 건물의 경우 큰 규모의 지진 발생할 시에도 일반용도 건물보다 뛰어난 내진성능과 지속적인 건물 기능유지가 가능해야 한다. 미국 내진설계기준^[2]에서는 건물의 인명 안전에 관련된 중요도에 따라 내진등급(risk category)을 I에서 IV로 분류하고 있다(한국 건축구조기준 내진설계에서는 내진등급을 특, I, II로 분류). 특히 내진 IV 등급으로 지정된 중요도가 높은 건물은 설계지진하중을 초과하는 지진이 발생할 시에도 지속적인 건물의 기능유지가 가능해야 한다. 내진 II 등급에 속한 일반용도 건물들과 비교하여 내진 IV 등급의 엄격한 내

Note.-Discussion open until December 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 30, 2020; revised May 21, 2020; approved on May 22, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-54-820-5847 Fax. +82-54-820-6255

E-mail. lsy@anu.ac.kr

진설계조항(높은 설계밀면전단력과 낮은 허용 층간변위)을 제시하고 있다. 이는 중요 건물 내 구조부재 및 비구조재의 보수·보강에 의한 경제적 손실을 최소화하기 위한 목적이다⁶⁾. 하지만 중요 건물에 대한 성능 목표의 달성여부를 파악하기 위해서는 지진에 의한 경제적 손실을 정확히 추정할 수 있어야 한다.

차세대 성능기반 설계법^{7),8)}은 확률론적 내진성능평가기법으로 경제적 손실 및 붕괴확률 등을 포함한 다양한 내진성능지표의 추정이 가능하다. 이는 건물 이해관계자로 하여금 지진 발생 직후 사회·경제적 손실을 효과적으로 최소화 가능한 최적의 내진설계 및 내진보강법을 지진재해 위험도에 기반을 둔 결정을 내리는데 유용하다. 성능기반설계법의 발전에 따라, 최근 지진에 의한 건물의 경제적 손실에 관련한 연구가 많이 이루어졌으나⁹⁾⁻¹¹⁾, 인명안전이 비교적 낮은 일반 사무용 건물에 대해 주로 수행되었다. 내진등급의 개념이 도입된 이후 높은 내진등급을 갖춘 건물의 내진성능 평가에 관한 연구는 제한적이며, 특히 높은 내진등급 건물의 경제적 손실평가에 관련한 연구는 전무하다.

본 연구에서는 높은 내진등급을 가진 철골 특수모멘트 골조 건물의 경제적 손실 및 붕괴확률을 포함한 지진위험도를 차세대 내진성능 평가법에 따라 검토하였다. 이를 위해 지진 발생빈도가 높은 강진지역인 북미 내에서 사용되고 있는 내진설계기준에 따라 설계된 대상건물에 대해 내진등급별 붕괴 위험도와 경제적 손실을 평가하였다.

2. 경제적 손실평가 기법

본 연구에서는 Ramirez and Miranda¹⁰⁾에 의해 제안된 경제적 손실 평가법에 따라 철골모멘트골조 시스템 건물의 예상 경제적 손실을 평가하였다. 건물의 경제적 손실은 지진피해를 입은 건물에 발생가능한 세 가지 결과에 의한 예상손실의 가중 합으로 계산될 수 있다: (1) 구조부재 및 비구조재의 지진 피해에 의한 경제적 손실, (2) 건물의 과도한 잔류(영구)변형에 의한 건물 철거 후 재건축에 의한 경제적 손실, 그리고 (3) 건물 붕괴 후 재건축에 의한 경제적 손실. 세 가지 결과가 상호배타적(mutually exclusive)이며 전체 포괄(collectively exclusive)이라고 가정하면, 주어진 지진강도세기(intensity measure, IM)에서 건물의 경제적 손실은 전확률 정리(total probability theorem)를 이용해 다음과 같이 수학적으로 표현가능하다.

$$E[L_T|IM] = E[L_R|NC \cap R, IM]P(NC \cap R|IM) + E[L_D|NC \cap D]P(NC \cap D|IM) + E[L_C|C]P(C|IM) \quad (1)$$

여기서 $E[L_R|NC \cap R, IM]$ 은 특정한 지진강도세기 $IM = im$ 와 건물이 붕괴되지 않은 조건에서 구조부재 및 비구조재의 보수에 연관된 경제적 손실이다. $E[L_D|NC \cap D]$ 은 건물이 붕괴되지 않은 조건에서 과도한 잔류변형에 의해 건물철거 후 재건축에 의한 경제적 손실이다. 본 연구에서는 이 경제적 손실 값을 건물철거비용, 현장 건물잔해청소, 재활용으로 인한 비용절감 등을 감안해 건물의 전체 교체비용의 110%로 가정하였다. $E[L_C|C]$ 은 건물 붕괴에 따른 경제적 손실이다. 이 경제적 손실량은 $E[L_D|NC \cap D]$ 와 동일하다고 가정하였다. $P(NC \cap R|IM)$ 은 특정한 지진강도세기 $IM = im$ 와 건물이 붕괴되지 않은 조건에서 구조부재 및 비구조재의 보수 확률이다. $P(NC \cap D|IM)$ 은 건물을 보수할 수 없는 것으로 간주하며 붕괴되지 않는 상황에서 철거 후 재건축해야 하는 확률이다. $P(C|IM)$ 은 주어진 지진 가속도의 크기 $IM = im$ 에서 건물이 붕괴되지 않을 확률로, $1 - P(C|IM)$ 와 동일하다. $P(C|IM)$ 은 특정 지진강도세기 $IM = im$ 에서의 조건부 붕괴 확률이다.

건물이 붕괴되지 않은 조건하에서 구조부재 및 비구조재의 보수와 건물의 철거는 상호배타적 사건이므로, 식 (1)은 다음과 같이 더욱 단순화될 수 있다.

$$E[L_T|IM] = E[L_R|NC \cap R, IM] \{1 - P(D|NC, IM)\} \{1 - P(C|IM)\} + E[L_D|NC \cap D]P(D|NC, IM)\{1 - P(C|IM)\} + E[L_C|C]P(C|IM) \quad (2)$$

지진이 발생된 후에 붕괴되지 않은 조건에서 건물이 철거되는 확률을 평가하기 위해서 $P(D|NC, IM)$ 는 다음의 관계로 표현할 수 있다.

$$P(D|NC, IM) = \int_0^\infty P(D|RSDR)dP(RSDR|NC, IM) \quad (3)$$

여기서 $P(D|RSDR)$ 은 잔류 층간변위비의 특정한 값에서 건물이 철거될 확률이며, 중간값 0.01 라디안과 0.3의 대수표준편차를 가지는 대수 정규 분포로 가정한다. $P(RSDR|NC, IM)$ 은 특정 지진강도세기 $IM = im$ 에서 건물이 붕괴되지 않고 보수할 수 있는 확률을 나타낸다.

3. 평가대상 건물 및 비선형 해석모델

본 연구에서는 건물의 내진등급별 경제적 손실을 평가하기 위하여 SAC Project^{[20],[21]}에서 사용된 미국 Los Angeles 지역의 3층과 9층 건물을 사용하였다. Fig. 1은 본 연구의 대상건물의 입면 및 평면을 보여준다. 대상건물은 3층과 9층의 건물 높이와 내진 II 등급과 IV를 고려하여 모델링하였다. 내진 II 등급 건물의 경우 일반 사무용으로, 내진 IV 등급의 건물용도는 방재센터로 가정하였다. 해당건물은 미국 Los Angeles 지역(34°00'N, 118°20'W)에 위치한 것으로 가정하였다. 해당 건물의 지반은 NEHRP의 지반 등급 D로 단단한 토사 지반으로 가정하였다.

본 연구에 사용된 확률적 지진위험도 평가는 평가대상 지역에서 발생할 수 있는 모든 발생가능한 지진의 빈도와 심각도(severity)를 나타내는 지역의 고유 특성을 반영한 지진재해도 곡선(site-specific seismic hazard curve, $\lambda(IM)$)이 필요하다. Fig. 2에서와 같이 건물 부지 위치에 대한 지역 기반 지진재해도 곡선은 5% 감쇠된 1차 모드 유사가속도에 기초하여 지진재해도 정보를 내포한다. 지진 재해도 곡선은 미국

지질조사국의 데이터를 이용하였다. Fig. 2는 내진 IV 등급인 3층과 9층 건물의 LA지역 특정 지진 재해도 곡선을 보여준다. 그림에서 보는 것과 같이 확률론적 지진 재해도 곡선은 대상건물의 고유주기에 크게 의존되는 점을 알 수 있다.

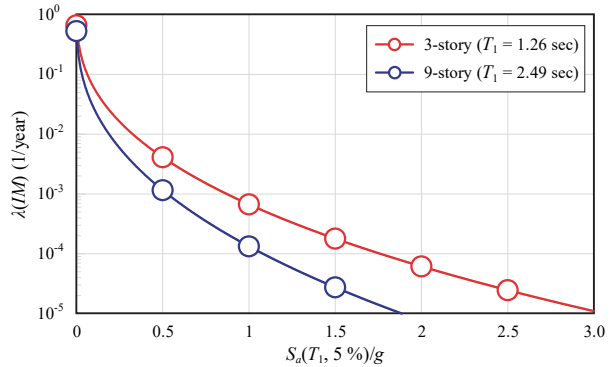


Fig. 2. Site-specific seismic hazard curves

내진 II 등급과 IV로 상한 설계(upper bound)된 건물의 교체비용(replacement cost)은 제곱미터당 \$2,691와 \$3,229로 각각 가정하였으며, 하한 설계(lower bound)된 건물의 교체비용은 사용 강재량을 고려하여 조정하였다. 건물의 정확

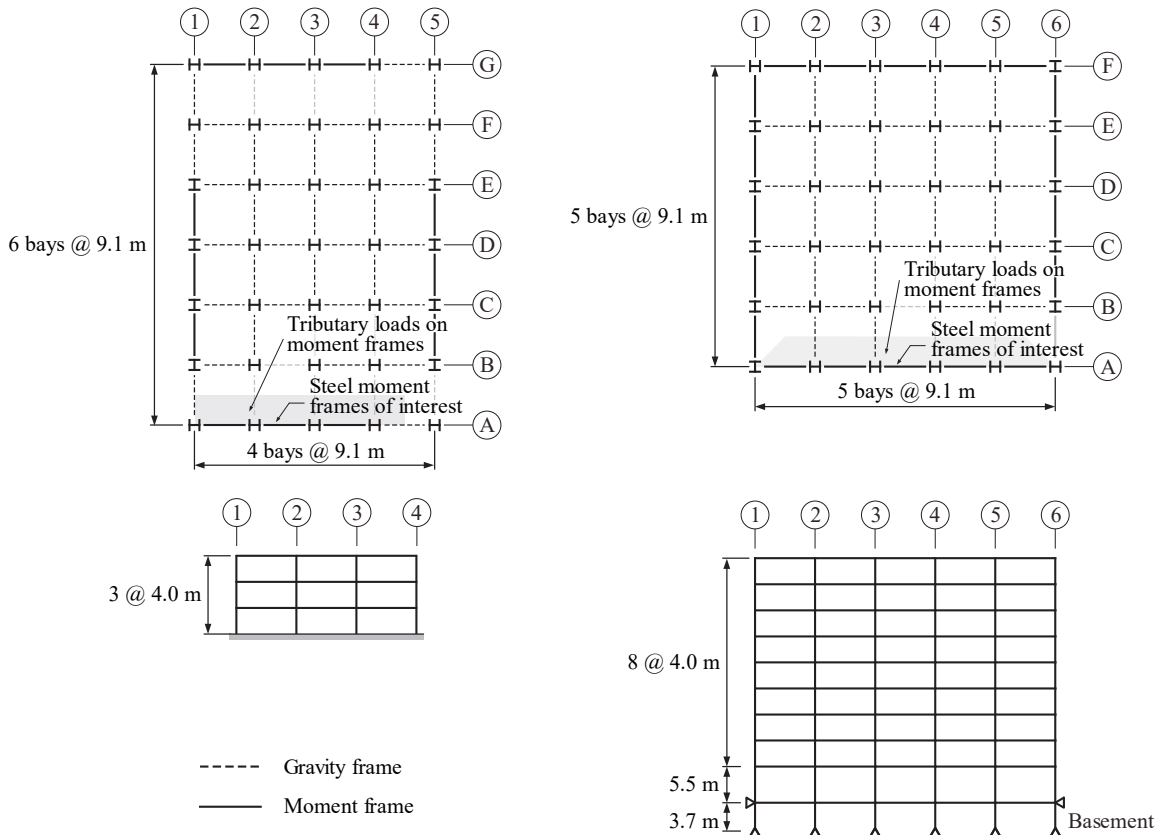


Fig. 1. Plan views and elevation layouts of the story steel frame buildings

한 경제적 손실 추정을 위해서는 건물 내 손상 가능한 구조 부재 및 비구조재의 정확한 수량 파악이 중요하며, FEMA P-58의 normative quantity estimation tool^[22]을 이용하여 건물 내 손상가능 요소의 수량을 추정하였다.

본 연구에서는 Jeong *et al.*^[23]의 연구에서 사용된 구조부재의 단면 및 강종을 사용하였으며, OpenSees^[24]을 이용하여 Fig. 3에서와 같이 테두리 모멘트골조만을 이차원으로 구조해석모델로 개발하였다. 특수모멘트골조의 모든 보와 기둥은 각 보와 기둥의 단부에 위치한 소성힌지와 선형 요소로 모델링하였다. 소성힌지의 이력응답은 강도와 강성의 저감 효과의 모사가 가능한 Modified Ibarra-Medina-Krawinkler의 이선형 모델^[25]을 이용하여 PEER/ATC 72-1^[26]에 따라 모델링하였다. Gupta and Krawinkler^[20]에 의해 개발된 삼선형의 전단변형의 평행사변형 요소로 패널존을 모델링하여 패널존의 실제 치수 및 강도, 강성을 고려하였다. P-Delta 효과를 반영하기 위하여 가상의 강제기둥을 모델링하고 중력 하중을 재하하였다.

대상건물의 지진피해위험도를 평가하기 위해 FEMA P-695의 44개 원거리 지진파를^{[27],[35],[36]}를 이용하여 동적증분해석^[28]을 수행하였다. 동적증분해석은 해석모델이 탄성 상태에서 동적불안정 상태에 이르기까지 수행하였다. 이 때 각 대상건물에 대한 동적해석에서 구한 지진강도세기(intensity measure, IM)와 응답변수(engineering demand parameter, EDP)는 경제적 손실과 붕괴확률 평가에 사용하였다. 본 연구에서 사용된 IM은 5% 감쇠비, 1차 모드 주기를 갖는 단자유도의 스펙트럼 가속도($S_a(T_1, 5\%)$)이며, EDP는 층간변위비, 잔류(영구변형) 층간변위비, 그리고 층 가속도를 사용하였다.

4. 지진 위험도 평가

철골 대상건물의 지진피해위험도는 붕괴위험과 경제적 손실위험의 두 성능지표를 통해 평가하였다. 특히 붕괴위험도는 건물 붕괴 재해도 곡선(collapse fragility curve)과 연평균 붕괴 빈도(mean annual frequency of collapse)를 이용하여 평가하였다. 지진에 의한 경제적 손실위험은 특정 지진 재해도에서의 예상 경제적 손실을 통해 평가하였다.

4.1 붕괴위험도 평가

Fig. 4는 하한 설계된 내진 II 등급, 9층 건물의 붕괴 성능 분포를 보여준다. 그림에서의 붕괴 재해도곡선은 동적증분 해석 결과를 토대로 추정하였으며, 추정된 붕괴 성능 중간값은 건물 응답의 보수적 편향을 피하기 위하여 스펙트럼 형상 계수(spectral shape factor, SSF)^[29]로 조정하였다. 또한 지반운동의 불확실성 이외의 모델링, 실험, 설계요구사항 등의 불확실성을 고려한 대수표준편차(β_{TOT})를 사용하였다^[28]. 그림에서 보는 것과 같이 9층 건물의 붕괴 성능 중간값은 스펙트럼 형상계수 1.17를 고려했을 경우 0.70 g에서 0.93 g로 증가하였다. 최대고려지진(maximum considered earthquake, MCE) 지반운동($S_{MT} = 0.43$ g)에 대한 조건부 붕괴확률은 11.5%로 ASCE/SEI 7^[2]의 허용 조건부 붕괴확률 10%를 초과하는 것을 알 수 있다.

Table 1은 동적증분해석을 통해 구한 대상건물의 붕괴 성능 중간값과 지반운동의 불확실성(β_{RTR})의 결과값이다. 상한 설계에 따른 대상건물의 붕괴 성능은 하한 설계된 건물에 비해 평균 1.83배 높은 것을 알 수 있다. 상한 설계법에 의한

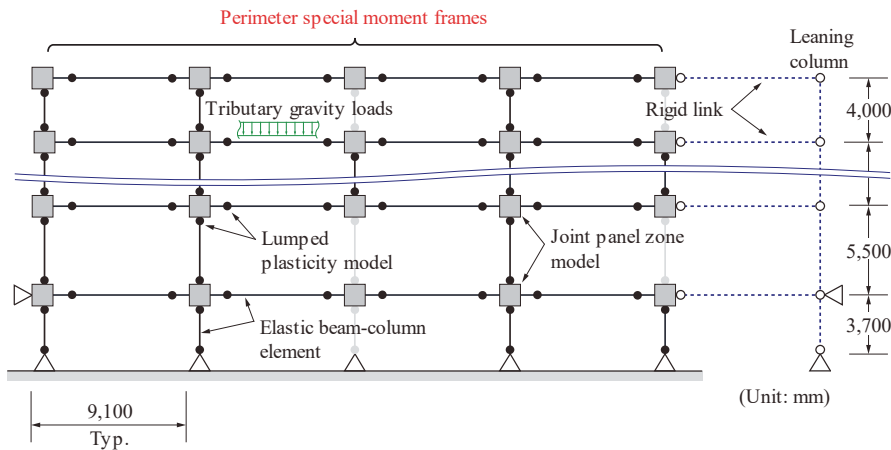


Fig. 3. Structural model of the 9-story steel frame building

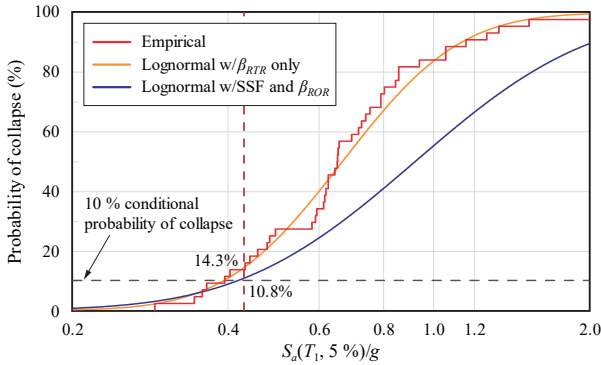


Fig. 4. Collapse fragility curves of the 9-story steel frame building

Table 1. Summary of median and record-to-record uncertainties of collapse fragility curves for all the structural models of steel frame buildings

ID	SSF	Median collapse capacity	
		\hat{S}_{CT}	β_{RTR}
03_II_LB	1.24	1.66	0.41
03_II_UB	1.26	3.48	0.35
09_II_LB	1.38	0.92	0.41
09_II_UB	1.40	2.40	0.39
03_IV_LB	1.26	3.72	0.37
03_IV_UB	1.25	5.80	0.40
09_IV_LB	1.33	4.02	0.44
09_IV_UB	1.31	4.45	0.39

붕괴 성능의 증가효과는 내진 IV 등급인 건물보다 내진 II 등급에서 더욱 두드러진다. 반면 내진 IV 등급과 같이 중요도가 높은 건물의 경우 상한 설계법의 효과는 9층보다는 3층과 같은 저층 건물에서 효과가 크게 나타난다. 이는 9층 건물의 경우 3층 건물에 비해 큰 부재가 사용되었기 때문이다. 본 연구에서의 지반운동의 불확실성은 선행 연구^{[28],[30]-[32]}에서 제시하는 불확실성 값과 유사한 0.35 - 0.44의 범위를 보였다.

붕괴 재해도곡선을 토대로 연평균 붕괴율(mean annual rate of collapse, λ_c)은 아래 식 (4)를 이용해 구할 수 있다.

$$\lambda_c = \int_0^\infty P(C|IM) |d\lambda(IM)| \quad (4)$$

건물 붕괴는 포아송 분포를 따른다는 가정 하에 건물의 생애주기 t 동안 붕괴확률을 연평균 붕괴율(λ_c)을 이용해 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c(t \text{ years}) = 1 - \exp(-\lambda_c \cdot t) \quad (5)$$

최근 ASCE/SEI 7^[2]에서는 내진등급별로 목표 생애주기 붕괴확률을 제시하고 있다. 내진 II 등급 건물의 경우 생애주기 50년 기간의 붕괴확률은 1% 미만인 되도록 제시하고 있다. 내진등급 IV 건물의 경우 ASCE/SEI 7^[2]에서는 구체적으로 붕괴확률은 제시하지 않고 있지만, NIST^[33]에서는 50년 동안 0.25%의 붕괴 확률을 채택된다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 내진 II 등급 건물의 생애주기 붕괴확률은 0.36%에서 4.75%이며, 내진 IV 등급 건물의 경우 0.10%에서 0.44%이다. 또한 대상 건물의 연평균 붕괴빈도는 상한 설계 적용 시 평균 4배 감소되는 것을 알 수 있다. 하한 설계법이 적용된 건물은 내진등급과 관계없이 ASCE/SEI 7^[2]이나 NIST^[33]에서 허용하는 붕괴위험을 충족하지 않음을 알 수 있다. 위 결과는 건물의 붕괴 위험이 근본적인 관심사라면 상한 설계법에 따른 설계횡하중과 허용변위비 검토로 내진설계를 하는 것이 뛰어난 내진성능을 확보할 수 있다는 점을 시사한다.

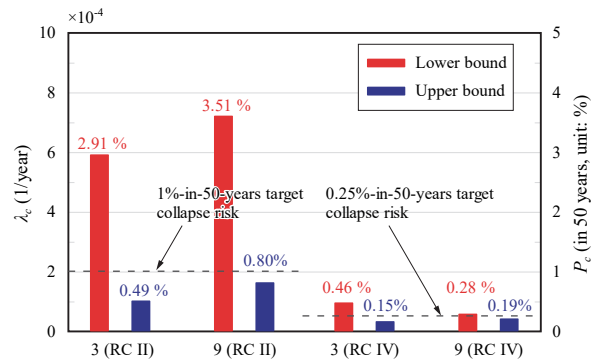


Fig. 5. Collapse risk of the structural models of the archetype steel frame buildings

4.2 경제적 손실 평가

Fig. 6은 내진 II 등급의 하한 설계된 9층 건물의 경제적 손실 곡선으로 경제적 손실 평가의 결과이며, 지진의 크기에 따른 경제적 손실을 보여준다. 그림에서 경제적 손실은 건물의 교체비용으로 정규화하여 표현하였으며, 예상 경제적 손실은 구조부재 및 비구조재의 보수와 건물 철거, 그리고 건물 붕괴에 따른 경제적 손실로 더욱 세분화하여 도시화하였다. 또한 설계 지진하중으로 정규화된 지반가속도를 나타내는 축을 추가하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 설계하중의 지진재해도 수준(design-basis earthquake, DBE)

까지는 비구조재의 보수에 의한 경제적 손실이 총 예상 경제적 손실의 대부분을 차지한다. 또한 MCE(1.5 × DBE) 이상의 지진 재해도에서는 건물의 과도한 잔류변형에 따른 건물 철거 후 재건축에 의한 경제적 손실이 총 경제적 손실의 주된 요인이다. 예상 경제적 손실의 관점에서 과도한 잔류 변형은 낮은 설계횡하중과 높은 허용 층변위로 설계된 내진 II 등급 건물은 과도한 잔류변형이 중요한 문제가 될 수 있음을 시사한다.

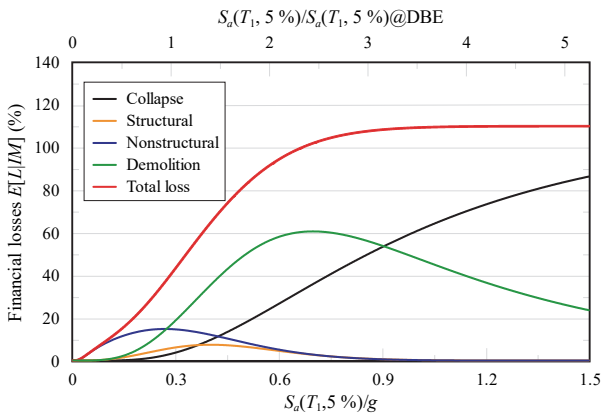


Fig. 6. Normalized loss vulnerability curves for 9-story, steel frame building conditioned on seismic intensity (LB design limit)

Fig. 7은 지진재해도별 대상건물의 정규화된 예상 경제적 손실 추정 결과값을 보여준다. Fig. 7(a)에서 보이는 바와 같이 중상 규모의 지진재해도(DBE)에서 내진 II 등급 대상 건물은 하한 설계법이 적용될 시 과도한 영구 변형에 의한 건물 철거 후 재건축이 전체 경제적 손실의 대부분을 차지하고 있다. 이는 철골모멘트골조의 뛰어난 연성능력 때문이다. 반면 상한 설계된 건물의 경제적 손실의 경우 대략 하한 설계된 건물의 절반이 해당하는 결과를 보였다. 이 결과는 상한 설계법이 철골모멘트골조의 잔류 층간변위비와 같이 지진 응답을 줄이는데 효과적임을 시사한다. 상한 설계된 내진 II 등급 건물의 경우 극한 지진하중(MCE) 하에서도 건물의 붕괴로 인한 경제적 손실은 크지 않으며, 이 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 건물의 붕괴 위험이 낮은 결과와 일치한다.

Fig. 7(b)은 내진등급이 높은 건물의 경제적 손실은 내진 II 등급인 건물보다 다양한 지진 크기에서 크게 낮음을 보여 준다. 이는 내진등급이 높은 건물이 개선된 내진설계사항을 반영하고 있기 때문이다. 그림에서 보이는 바와 같이 건물 철거와 건물 붕괴에 따른 경제적 손실은 층수에 상관없이 DBE 지진하중 하에서 크지 않으나, FEMA P-58 지침에서

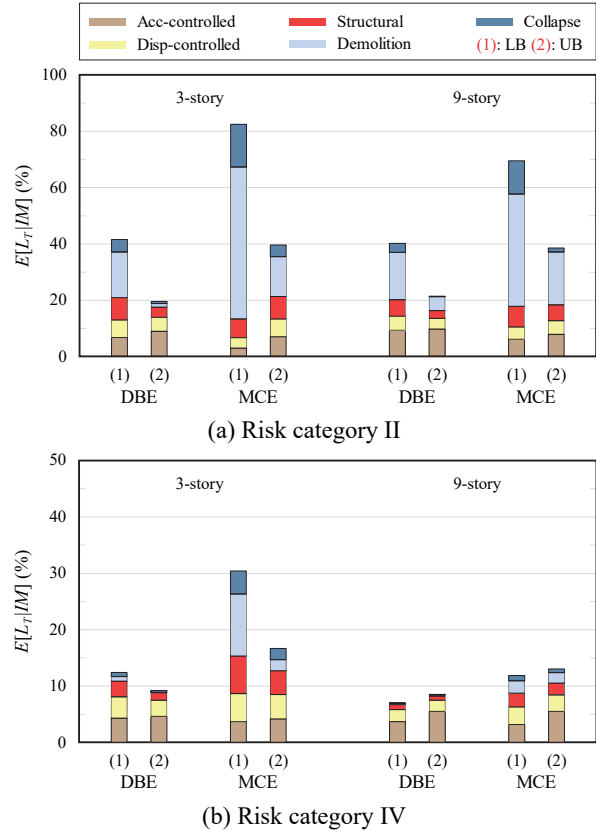


Fig. 7. Normalized expected losses of steel frame buildings (conditioned on selected ground motion intensities)

제시하는 내진 IV 등급 건물의 허용 경제적 손실인 5%를 초과한다. 또한 낮은 확률로 발생가능한 지진(MCE)에서도 건물 철거와 붕괴는 내진설계 범주 II의 건물의 경우와 달리 건물의 총 경제적 손실의 주요인은 아니며, 대신 비구조재의 보수가 예상 경제적 손실의 가장 큰 요인이다. 상한 설계법이 적용될 때 내진 IV 등급건물의 경제적 손실은 FEMA P-58^[34]에서 MCE 지진하중 하에서의 경제적 손실에 관한 성능 기대치인 건물 교체비용 대비 15%를 만족하지 못했다.

5. 결론

본 연구는 최신 내진설계기준에 따라 설계된 철골특수모멘트골조 건물의 내진성능을 평가하였다. 내진성능은 붕괴 위험과 경제적 위험의 측면에서 평가하였다. 평가대상 건물은 내진 II 등급과 IV로 설계되었으며, 각 평가대상 건물은 횡강성과 강도 검토를 위한 설계 밀면전단력을 결정하기 위해 두 가지 설계법으로 설계하였다. 상한 설계법은 각 건물형상 내에서 예상 최대 내진성능을 위해서 ASCE/SEI 7^[2]의 경

험식을 토대로 구한 주기를 통해 횡강도와 층간변위를 검토하였다. 하한 설계법은 횡강도 및 층간변위 검토를 위한 설계 밀면전단력을 결정하기 위해 고유치해석을 기반으로 평가된 주기를 사용하였다. 이를 토대로 미국 내 강진지역에 총 8개의 철골특수모멘트골조 시스템 건물을 설계하였다. 이를 위해 다양한 불확실성을 고려하여 포괄적인 건물별 손실 평가가 가능한 차세대 성능기반 설계법을 사용하여 지진으로 인한 경제적 손실과 붕괴확률을 대상건물의 내진성능평가를 위하여 구하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

일반 용도(내진 II 등급)의 대상건물의 경우 붕괴위험도는 내진 IV 등급 건물보다 크게 높았다. 또한 지진 활동 빈도가 높은 지역에 설계된 건물의 붕괴 위험이 근본적인 관심사인 경우, 상한 설계법은 하한 설계법과 비교하여 횡강도와 강성의 측면에서 보다 보수적인 설계방식이며, 강진 지역의 경우 붕괴위험도가 주된 고려사항이면 상한 설계법이 효과적이었다. 또한 붕괴 위험도 평가에 있어서 조건부 붕괴확률을 사용할 경우 실제 건물의 붕괴위험도는 과소평가될 수 있다. 발생확률이 높은 지진하중 하에서는 가속도에 민감한 비구조재의 보수가 건물의 전체 경제적 손실의 가장 큰 요소이다. 내진 II 등급 건물의 경우, 설계지진하중 이상의 지반 운동에서 영구변형에 따른 건물의 철거와 교체로 인한 경제적 손실은 내진등급II 건물에 주된 고려사항이다. 이 경우, 하한 설계법과 비교하여 횡강도와 층간변위 검토를 위한 더 높은 밀면전단력이 사용되고, 더 큰 지진 응답에 저항할 수 있는 상한 설계법으로 설계되어야 한다. 다양한 지진강도세기에서 내진 IV 등급 건물의 경제적 손실은 비구조재의 보수에 의한 것이다. 이는 지진 발생 직후에도 지속적인 기능 수행을 요하는 건물은 비구조재의 내진설계 상세에 더욱 주의를 요해야 함을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Architectural Institute of Japan (2007) *Japanese Architectural Standard Specification (JASS 6): Structural Steelwork Specification for Building Construction*, Japan (in Japanese).
- [2] American Society of Civil Engineers (2016) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-16), USA.
- [3] Canadian Standard Association (2009) *Design of Steel Structures* (CAN/CSA-S16-09), Canada.
- [4] Kasai, K., Mita, A., Kitamura, H., Matsuda, K., Morgan, T.A., and Taylor, A.W. (2013) Performance of Seismic Protection Technologies During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.29, No.S1, pp.S265-S293.
- [5] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., and von Winterfeldt, D. (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.19, No.4, pp.733-752.
- [6] Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences (2015) *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Volume II: Part 3 Resource Papers*, FEMA P-1050-2, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [7] Cornell, C.A., and Krawinkler, H. (2000) Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment, *PEER Center News*, Pacific Earthquake Engineering Research Center (University of California Berkely), Vol.3, No.2, pp.1-3.
- [8] Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency (2012) *Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1: Methodology*, FEMA P-58-1, FEMA, USA.
- [9] Mitrani-Reiser, J. (2007) *An Ounce of Prevention: Probabilistic Loss Estimation for Performance-Based Earthquake Engineering*, Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, USA.
- [10] Ramirez, C.M., and Miranda, E. (2012) Significance of Residual Drifts in Building Earthquake Loss Estimation, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.41, No.11, pp.1477-1493.
- [11] Shoraka, M.B., Yang, T.Y., and Elwood, K.J. (2013) Seismic Loss Estimation of Non-Ductile Reinforced Concrete Buildings, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.42, No.2, pp.297-310.
- [12] Porter, K.A., Scawthorn, C.R., and Beck, J.L. (2006) Cost-Effectiveness of Stronger Woodframe Buildings, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.22, No.1, pp.239-266.
- [13] Pei, S., and van de Lindt, J.W. (2009) Methodology for

- Earthquake-Induced Loss Estimation: An Application to Woodframe Buildings, *Struct Safety*, Elsevier, Vol. 31, No.1, pp.31-42.
- [14] Hutt, C.M., Almufti, I., Willford, M., and Deierlein, G.G. (2016) Seismic Loss and Downtime Assessment of Existing Tall Steel-Framed Buildings and Strategies for Increased Resilience, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.142, No.8, C4015005.
- [15] Hwang, S.-H., and Lignos, D.G. (2017) Earthquake-Induced Loss Assessment of Steel Frame Buildings with Special Moment Frames Designed in Highly Seismic Regions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.46, No.13, pp. 2141-2162.
- [16] Hwang, S.-H., and Lignos, D.G. (2017) Effect of Modeling Assumptions on the Earthquake-Induced Losses and Collapse Risk of Steel-Frame Buildings with Special Concentrically Braced Frames, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.143, No.9, 04017116.
- [17] Guan, X., Burton, H., and Moradi, S. (2018) Seismic Performance of a Self-Centering Steel Moment Frame Building: From Component-Level Modeling to Economic Loss Assessment, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.150, pp.129-140.
- [18] Hutt, C.M., Rossetto, T., and Deierlein, G.G. (2019) Comparative Risk-Based Seismic Assessment of 1970s vs Modern Tall Steel Moment Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.159, pp.598-610.
- [19] Nikellis, A., Sett, K., and Whittaker, A.S. (2019) Multi-hazard Design and Cost-Benefit Analysis of Buildings with Special Moment-Resisting Steel Frames, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.145, No.5, 04019031.
- [20] Gupta, A., and Krawinkler, H. (1999) *Seismic Demands for the Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures*, Blume Center Technical Report No. 132, The John A. Blume Earthquake Engineering Center (Stanford University), USA.
- [21] Lee, K., and Foutch, D.A. (2000) *Performance Prediction and Evaluation of Steel Special Moment Frames for Seismic Loads*, Report No. SAC/BD-00/25, SAC Joint Venture, USA.
- [22] Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency (2012) *Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 3: Supporting Electronic Materials and Background Documentation*, Report No. FEMA P-58-3, FEMA, USA.
- [23] Jeong, S.-H., Kwon, O.-S., and Lee, K.-H. (2015) Effective Periods and Seismic Performance of Steel Moment Resisting Frames Designed for Risk Categories I and IV According to IBC2009, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.44, No.9, pp.1427-1447.
- [24] McKenna, F.T. (1997) *Object-Oriented Finite Element Programming Frameworks for Analysis, Algorithms and Parallel Computings*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, USA.
- [25] Ibarra, L.F., Medina, R.A., and Krawinkler, H. (2005) Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.34, No.12, pp. 1489-1511.
- [26] Applied Technology Council (2010) *Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings*, Technical Report No. PEER/ATC 72-1, Pacific Earthquake Engineering Research Center (University of California Berkeley), USA.
- [27] Applied Technology Council (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Report No. FEMA P695, Federal Emergency Management Agency, USA.
- [28] Vamvatsikos, D, and Cornell, C.A. (2002) Incremental Dynamic Analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.31, No.3, pp. 491-514.
- [29] Haselton, C.B., Baker, J.W., Liel, A.B., and Deierlein, G.G. (2011) Accounting for Ground-Motion Spectral Shape Characteristics in Structural Collapse Assessment Through an Adjustment for Epsilon, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.137, No.3, pp.332-344.
- [30] Elkady, A., and Lignos, D.G. (2014) Modeling of the Composite Action in Fully Restrained Beam-to-Column Connections: Implications in the Seismic Design and Collapse Capacity of Steel Special Moment Frames, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.43, No.13, pp.1935-1954.
- [31] Zareian, F., and Krawinkler, H. (2007) Assessment of Probability of Collapse and Design for Collapse Safety,

- Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.36, No.13, pp.1901-1914.
- [32] NEHRP Consultants Joint Venture (2010) *Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Report No. NIST GCR 10-917-8, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [33] NEHRP Consultants Joint Venture (2012) *Tentative Framework for Development of Advanced Seismic Design Criteria for New Buildings*, Report No. NIST GCR 12-917-20, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [34] Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency (2018) *Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 5: Expected Seismic Performance of Code-Conforming Buildings*, FEMA P-58-5, FEMA, USA.
- [35] Han, S.W., Kim, T.O., and Ha, S.J. (2017) Seismic Performance Evaluation of Special Moment Steel Frames with Torsional Irregularities - I Seismic Design, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.5, pp.361-368 (in Korean).
- [36] Han, S.W., and Kim, T.O. (2017) Seismic Performance Evaluation of Special Moment Steel Frames with Torsional Irregularities - II Improving Seismic Design Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.5, pp.369-376 (in Korean).

요 약: 자연재난 발생 중/후, 우리 사회의 최우선 과제는 건설환경의 지속적 기능이 유지함으로써 인명 및 삶의 질을 보호하는 것에 있다. 이러한 점에서 중요 건물은 자연재난 후 제한된 지진피해를 보이며, 시민보호를 위해 중요한 역할을 수행할 수 있어야 한다. 본 논문은 높은 지진 위험도 범주로 분류된 중요 건물의 지진 위험도를 평가하였다. 평가대상 건물 중 일반 사무용 건물은 건물 붕괴 위험성이 아주 컸으며, 중요 건물의 경우, 비구조재 요소의 수리에 의한 경제적 손실이 아주 컸다.

핵심용어: 철골모멘트골조, 지진 위험도 범주, 붕괴 위험성, 경제적 손실 평가, 지진 효과
