

비내력벽을 가진 RC모멘트저항골조의 취약도 해석

Fragility Analysis of RC Moment Resisting Frame with Masonry Infill Walls

고 현† 박 용 구* 이 동 근**

Ko, Hyun Park, Yong-Koo Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2009년 6월 10일 ; 심사종료일 : 2009년 8월 5일)

요 지

국내에 많이 건설되고 있는 빌라형 주택은 건축적인 요구를 위하여 저층부에 필로티를 두고 있는 경우가 많다. 구조물 상층부의 비내력벽에 의하여 저층에 연약층을 유발하고 따라서 지진에 매우 취약하다. 그러나 설계시 일반적인 설계방법과 동일하게 상부층의 칸막이벽은 비구조체로 간주되어 무시된다. 그러므로 설계단계에서 무시되는 비내력벽의 유무에 따라서 건축물이 어떠한 지진거동의 차이점을 보이는지 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 대상 건축물의 지진취약도 해석을 통하여 비내력벽의 유무에 따른 건축물의 지진거동을 평가하였다. 비내력벽의 유무에 따른 동일한 골조를 가지는 저층 철근콘크리트 건축물을 적용하여 지진거동에서 비내력벽의 영향을 평가하였다. 비내력벽은 보편화된 모형화 방법인 등가의 대각 압축 스트럿으로 고려하였다. 골조만 있는 모델과 연약층이 있는 모델의 취약도곡선을 비교하였다. 해석 결과로 연약층이 있는 RC 건물의 내진성능은 설계기준에서 제시하고 있는 성능수준을 만족하지 못하며 지진에 취약함을 보여준다.

핵심용어 : 지진취약도, 비구조체, 등가 대각 스트럿, 연약층, 내진성능

Abstract

Many of residential buildings, which have pilotis in lower stories to meet the architectural needs, are recently constructed in Korea. Usually, infill walls located in the upper stories of these buildings may cause a soft first story, which is very weak from the earthquake resistance. In the design of the buildings, the infill walls of upper stories are usually considered as non-structural elements and thus they are not included in the analytical model. However, the infill walls may affect the seismic behavior of the residential buildings. Therefore, the differences in seismic behaviors of RC buildings with and without masonry infill walls are required to be investigated. In this study, seismic fragility analyses were performed for masonry infilled low-rise RC moment-resisting frames. And seismic behaviors of RC moment-resisting frame with/without masonry infill walls were evaluated. Two types of structural system with the same frame and different allocation of infill walls are used to evaluate the influence of masonry infill walls on seismic behavior of RC moment-resisting frames. The infill walls were modeled as bi-equivalent diagonal struts. The fragility analyses show that the seismic performance of RC moment-resisting frames with soft story is below the desirable building seismic performance level recommended by current seismic codes, indicating high vulnerability of RC moment-resisting frames with soft story.

Keywords : fragility analysis, non-structural element, equivalent diagonal struts, soft story, seismic performance

1. 서 론

건축물의 내진설계는 예상되는 지진하중에 대하여 목표된 내진성능을 가질 수 있도록 수행한다. 그러나 지진하중은 동적하중으로 일반적인 하중과는 달리 그 발생빈도와 규모에

있어서 높은 불확실성을 포함하고 있으며 지진하중에 의한 구조물의 거동 또한 구조물의 재료특성, 부재설계 등에서 불확실성을 내재하고 있다. 그러므로 대상 건축물의 지진응답이나 내진성능을 확정하여 예측할 수 없으며, 이에 대한 검증은 위하여 확률적 접근법이 필요하다. 지진에 대한 건축물

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정
Tel: 031-290-7574 ; Fax: 031-290-7570
E-mail: amatura@skku.edu

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

** 종신회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

의 확률적 성능평가에 대해서는 지진하중에 대한 건축물의 손상확률 또는 파괴확률을 나타내는 지진취약도 함수를 작성하여 대상 건축물에 대한 지진위험도를 평가하는 방법을 이용하고 있으며 국내외로 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

지난 10년 동안 국내에 많이 건설되고 있는 저층 빌라형 주택은 골조는 철근콘크리트로 타설하고 외벽은 벽돌로 조적하여 시공된 구조물로 건축적인 요구에 따라서 저층부에 필로티를 두고 있는 경우가 많다. 그러나 대부분의 경우에 구조설계시 비내력벽은 비구조체로 고정하중으로만 고려하고 구조물의 거동에 유리하게 작용할 것이라는 가정으로 건물의 모형화에서 무시된다. 이것은 구조물 상층부의 비내력벽에 의하여 저층에 연약층을 유발하고 따라서 지진에 매우 취약할 수 있다. 그러므로 설계단계에서 무시되는 비내력벽의 유무에 따라서 건축물에서 발생하는 지진거동의 차이점을 비교하고 내진성능을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 내진성능의 평가수단으로 지진하중과 구조물 재료특성의 불확실성을 고려한 대상 건축물의 지진취약도 해석을 통하여 비내력벽의 유무에 따른 건축물의 지진거동의 차이점 및 내진성능을 평가하고자 한다. 보편화된 모형화 방법인 등가의 대각 압축 스트럿(equivalent diagonal strut)으로 비내력벽을 고려하여 비내력벽의 유무에 따른 저층 철근콘크리트 건축물을 모형화하였으며 지진하중의 강도는 유효최대지반가속도(Effective Peak Ground Acceleration, EPA)를 이용하여 각 건축물에 대하여 지진취약도를 작성하였다.

2. RC모멘트저항골조의 취약도 함수

2.1 연구동향

RC건축물의 취약도 해석에 관한 국외 연구로 Kwon 등(2006)은 RC건축물의 지진취약도함수에 영향을 주는 구조물의 불확실성, 지진하중의 불확실성에 관한 연구로 지반운동의 선택, 한계상태의 정의, 결과의 통계적 방법, 구조재료의 불확실성의 효과 등을 연구하였다. 연구결과로 구조물의 응답은 구조재료의 불확실성보다는 지반운동의 특성에 더 민감하므로 지반운동의 선택과 조정방법, 적절한 한계상태를 정의하는 것이 중요하다고 하였다.

Kircil 등(2006)은 자국의 내진기준으로 설계된 중층 RC모멘트저항골조를 대상구조물로 12개의 인공지진을 이용하여 시간이력해석을 수행하고 취약도함수를 개발하였다. 취약도함수를 작성하기 위한 지진강도 지표는 스펙트럼 가속도(Pseudo Spectral Acceleration, S_a), 최대지반가속도(Peak Ground

Acceleration, PGA), 스펙트럼 변위(Spectral Displacement, S_d)를 이용하였다. 연구결과로 취약도함수에 중요한 영향을 미치는 것은 구조물의 층수이며 회귀분석을 통하여 층수에 따른 취약도 매개변수를 산정하였다.

국외의 지진취약도와 관련한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며 미국 FEMA에서는 지진피해 추정프로그램인 HAZUS를 구축하여 운용하고 있다.

국내에도 교량, 원자력발전소 등의 토목분야와 철골, 철근콘크리트골조의 취약도 해석에 대한 연구 등 최근 지진취약도에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

박주남 등(2007)의 연구에서는 내진성능의 확률적 평가를 위하여 철근콘크리트 빌딩구조물의 지진취약도를 작성하고 내진설계 도입의 필요성 검증을 위하여 의사결정해석 절차를 등가비용모델의 예를 들어서 제시하였다. 구조물의 내진성능 평가에 있어서 중요한 점은 지진하중의 강도층정지수에서부터 구조물의 손상지수, 손상정도 손실산정에 이르기까지 일관된 매개변수를 사용하여야 한다고 하였다.

정우영 등(2009)은 국내 저층 철근콘크리트 모멘트골조를 대상으로 미국 HAZUS에서 제시하고 있는 지진취약도 곡선과 능력스펙트럼해석을 이용하여 도출된 지진취약도 곡선을 비교 및 검토하여 HAZUS에서 제안된 취약도함수 매개변수의 국내 적용성을 검토하였다. 취약도곡선을 비교하고 손상정도를 평가한 결과, 전체적으로 유사한 경향을 나타내었고 저층 철근콘크리트 모멘트골조의 경우는 HAZUS의 취약도함수 매개변수를 도입하여도 지진손상정도에 큰 차이는 없을 것으로 판단된다고 하였다.

국외에서는 본 연구에서의 대상건축물인 비내력벽을 가지는 RC골조의 내진성능평가에 대한 연구 또한 진행되고 있으나 국내에서는 비내력벽을 가지는 RC골조에 대한 내진성능평가 및 지진취약도에 관한 연구는 부족한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 보편화된 모형화 방법인 등가의 대각 압축 스트럿으로 비내력벽을 모형화하고 비내력벽을 가지는 RC골조의 취약도해석을 수행하고자 한다. 지진하중의 불확실성은 설계가속도스펙트럼의 수준으로 조정된 지반운동으로 고려하고 구조물 재료특성의 불확실성은 콘크리트 압축강도의 불확실성으로 고려한다.

2.2 취약도함수의 작성

구조물의 내진성능평가에 있어서 중요한 점은 지진하중의 강도, 구조물의 응답 및 손상 수준을 산정할 때 일관된 매개변수를 사용하여야 한다는 점이다(박주남, 2008). 본 연구에서 지진하중의 강도는 유효최대지반가속도(EPA)를 사용하

표 1 구조물의 성능수준(FEMA-356, 2000)

Damage Levels	Structural Performance Levels		
	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy
Concrete Frames	4.0%	2.0%	1.0%
Unreinforced Masonry Infill Walls	0.6%	0.5%	0.1%

고 구조물의 손상수준으로는 많이 이용되고 있는 최대층간변위률(Maximum Interstory Drift Ratio)을 적용하여 비선형해석을 수행하였다. 표 1은 FEMA-356(2000)에서 제시하는 구조물의 성능수준을 나타낸다.

취약도 함수를 작성하기 위하여 지진강도를 나타내는 지진강도 지표를 결정하여야 한다. 지반운동의 크기를 나타낼 수 있는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 구조물의 고유주기 특성이 반영된 응답 특성을 보여주는 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration, S_a), 스펙트럼 변위(Spectral Displacement, S_d)가 많이 사용되지만 본 논문에서는 스펙트럼 가속도의 종류로 구조물에 큰 영향을 미치는 주기범위에서 산정된 유효최대지반가속도(EPA)를 사용하였다. 유효최대지반가속도를 지표로 적용하면 설계지진하중의 수준과 구조물의 응답의 관계를 직관적으로 판단할 수 있어서 유용할 것으로 판단된다. 연구에서 사용한 지진하중의 유효최대지반가속도는 가속도응답스펙트럼을 작성하여 가속도응답이 증폭되는 주기범위에서의 평균값을 2.5로 나누어 산정하고 지진하중은 예제구조물의 설계지진하중의 크기로 조정한다. 해석시에는 조정된 지진하중의 유효최대지반가속도를 0.1g씩 증가시켜서 각 예제구조물에 적용하였다. 예제구조물의 불확실성을 나타내는 확률변수로는 콘크리트의 압축강도만을 고려하였다. 콘크리트의 압축강도는 평균값이 공칭강도의 1.14배, 변동계수 0.14의 정규분포를 따르는 것으로 정의하였다(Singhal, 1996). 예제구조물에 사용한 콘크리트의 공칭강도는 2.4kN/cm^2 이며, 표 2는 공칭강도의 1.14배, 변동계수 0.14의 정규분포를 이용하여 10개의 난수를 생성하고 그에 대응하는 콘크리트의 압축강도, 탄성계수를 나타낸다.

지진취약도에서 구조물의 손상수준을 D 라고 하고 구조물의 응답이 손상수준과 같거나 넘어섰을 때의 누적손상확률은 다음의 누적로그정규분포로 표현할 수 있다.

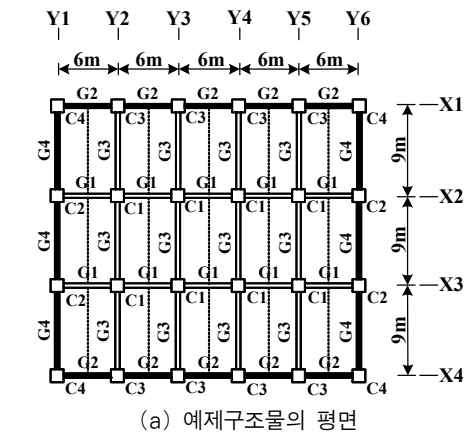
$$P(\leq D) = \Phi\left(\frac{\ln X - \lambda}{\zeta}\right) \quad (1)$$

여기서, Φ 는 누적로그정규분포, X 는 로그분포를 가지는 지진강도 지표(PGA, S_a , S_d 등), λ 와 ζ 는 $\ln X$ 의 중간값 및 표준편차를 의미한다.

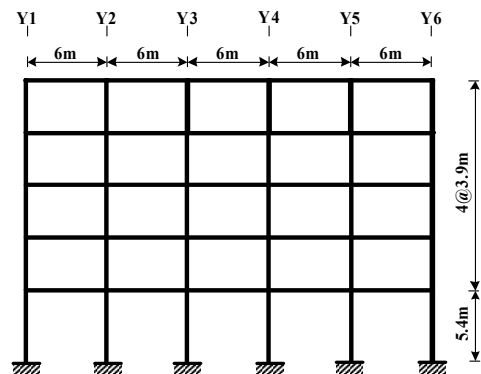
3. 예제구조물 및 지진하중

3.1 설계조건 및 해석모델

예제구조물은 5층 RC모멘트저항골조로 평면 및 입면은 그림 1의 (a)와 (b)와 같다. 고정하중과 활하중은 5.5kN/m^2 , 2.5kN/m^2 를 적용하였다. 풍하중과 지진하중은 UBC-97을 따르며 지진하중의 산정은 지진구역 2B, 지반종류 S_B , 중요도 계수 1.0, 구조시스템은 중간모멘트저항골조(IMRF)로 가정하였다. 설계된 각 주요부재의 단면의 위치와 단면정보는 그림



(a) 예제구조물의 평면



(b) 예제구조물의 입면

그림 1 예제구조물 평면 및 입면

표 2 콘크리트 압축강도 및 탄성계수(kN/cm^2)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
압축강도	2.62	2.35	3.22	2.45	2.59	2.14	2.23	3.07	2.98	2.93
탄성계수	2426.0	2300.0	2690.0	2347.0	2415.0	2192.0	2241.0	2629.0	2588.0	2567.0

표 3 주요부재의 단면정보(단위: mm)

기둥	층	단면크기	보	층	단면크기
C1	1~2	500×500	G1	전층	500×300
	3~5	400×400			
C2	1~2	500×500	G2	전층	500×300
	3~5	400×400			
C3	1~2	500×500	G3	전층	600×300
	3~5	400×400			
C4	1~2	400×400	G4	전층	600×300
	3~5	400×400			

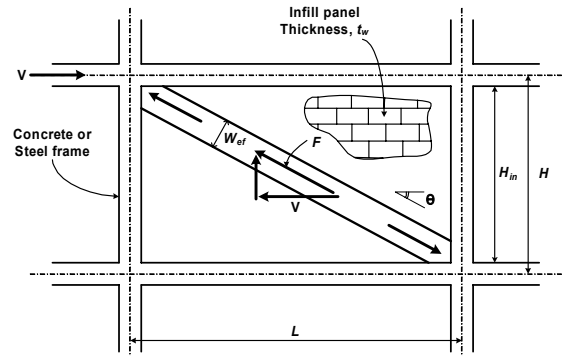
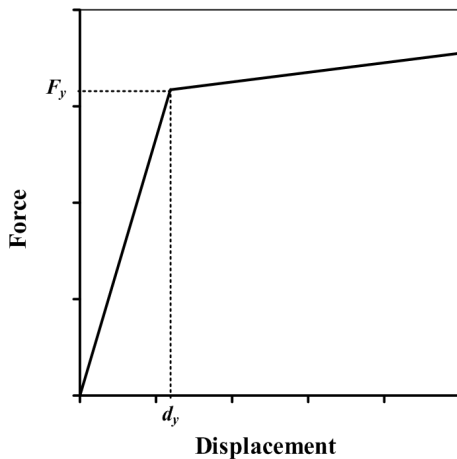
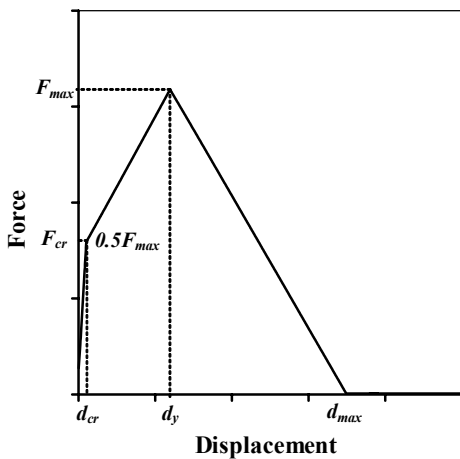


그림 3 등가의 대각 압축 스트럿의 모형화



(a) 보, 기둥 요소

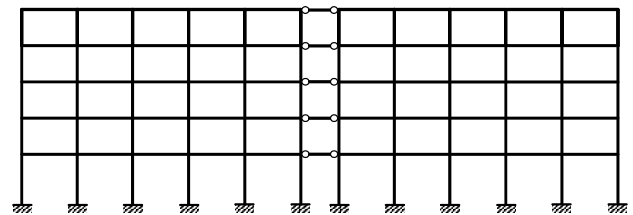


(b) 비내력벽 요소(등가 스트럿)

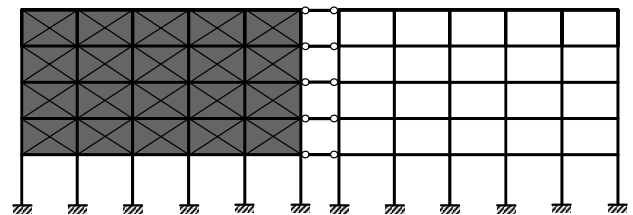
그림 2 각 부재요소의 이력거동

1과 표 3에 나타내었다.

해석은 DRAIN-2DX를 사용하였으며 그림 1(a)에서 보는 것과 같이 X-축에 대하여 대칭이므로 해석모델은 그림 4와 같이 외부골조와 내부골조를 강체요소로 연결한 등가의 2차원 등가골조로 모형화하였다. 보와 기둥 요소의 이력거동은 그림 2(a)와 같이 2%의 변형률경화비를 가지는 이선형 힌지로 정의하고 Beam-column element를 적용하였다. 비내력벽 요소는 압축력을 받는 등가의 대각 압축 스트럿으로



(a) BF Model



(b) SS Model

그림 4 해석모델

모형화하여 그림 2(b)와 같이 강성과 강도저감의 효과를 가지도록 이력거동을 정의하였다.

그림 3과 같이 등가의 대각 압축 스트럿의 균열변위, 최대 변위, 최대항하중, 초기강성 등은 Matjaz 등(2002)의 연구 논문을 따른다. 스트럿의 초기강성(K_{in}), 유효폭(W_{ef}), 최대 항강도(F_{max})는 식 (2)~(4)와 같다.

$$K_{in} = \frac{E_w W_{ef} t_w}{\sqrt{H^2 + L^2}} \cos^2 \theta \quad (2)$$

$$W_{ef} = 0.175 (\lambda_h H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2} \quad (3)$$

$$F_{max} = 0.818 \frac{L_{in} t_w f_{tp}}{C_I} (1 + \sqrt{C_I^2 + 1}) \quad (4)$$

여기서, $\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_w t_w \sin(2\theta)}{4E_c I_c H_{in}}}$, $C_I = 1.925 \frac{L_{in}}{H_{in}}$, E_w : 조적식 비내력벽의 탄성계수, E_c : 콘크리트의 탄성계수, t_w : 조적식 비내력벽의 두께, I_c : 골조기둥의 단면2차모멘트, H_{in} : 조적식 비내력벽의 순높이, H : 층높이, L : 골조의 경간길이, f_{tp} : 조적식 비내력벽의 균열강도, L_{in} : 조적식 비내력벽

의 길이, $\theta = \arctan(H/L)$: 대각선의 기울기이다.

비내력벽의 해석모델의 균열변위와 최대변위는 NZSEE (2006)의 “Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes”에서 규정하고 있는 층높이의 0.5%, 1.5%로 정하여 모형화하였다.

그리고 외부골조의 외벽에 비내력벽을 고려하지 않은 모델을 그림 4(a)의 BF Model(Bare Frame Model), 비내력벽을 고려하여 연약층이 있는 모델을 그림 4(b)의 SS Model(Soft Story Model)로 구분하였다.

3.2 지진하중

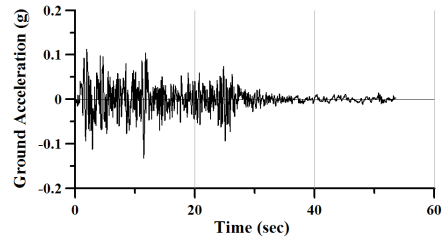
미국, 국내 내진설계기준(UBC, IBC, KBC)의 설계응답스펙트럼은 Newmark & Hall의 탄성설계응답스펙트럼의 원리로 작성되었다. 설계기준의 설계응답스펙트럼을 작성하기 위한 증폭계수는 표 4의 5% 탄성설계응답스펙트럼의 Median+1 σ 와 대응된다. 그러므로 취약도함수를 작성하기 위하여 사용되는 지반운동을 조정하는 기준은 Median+1 σ 가 아니라 Median으로 정하는 것이 합당하다고 판단된다.

그림 5(a)는 예제구조물의 설계시 적용한 Median+1 σ 와

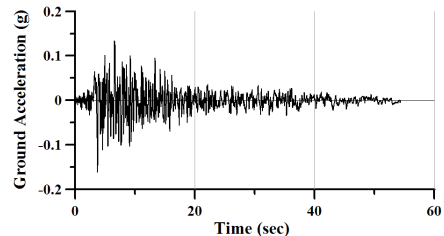
Median의 설계응답스펙트럼을 나타낸다. 그림 5(b)는 본 연구에서 사용한 지진하중을 설계응답스펙트럼의 수준으로 조정하여 스펙트럼으로 나타내었다. 설계응답스펙트럼과 비슷한 스펙트럼 형태와 설계시 비슷한 지반조건을 가지는 2개의 실제지진데이터를 선택하였고 설계스펙트럼과 같은 수준을 가지는 인공지진데이터를 생성하였다. 해석에 사용한 조정된 지반운동의 시간이력곡선은 그림 6과 같다. 지진하중을

표 4 증폭계수: 탄성설계스펙트럼

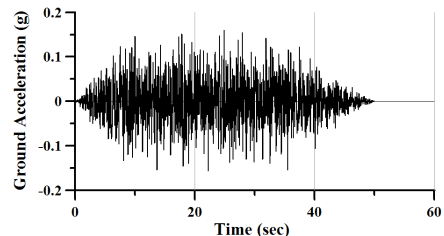
Damping, ζ (%)	Median (50th percentile)			One Sigma (84.1th percentile)		
	α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.39	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38



(a) El Centro EQ N90E

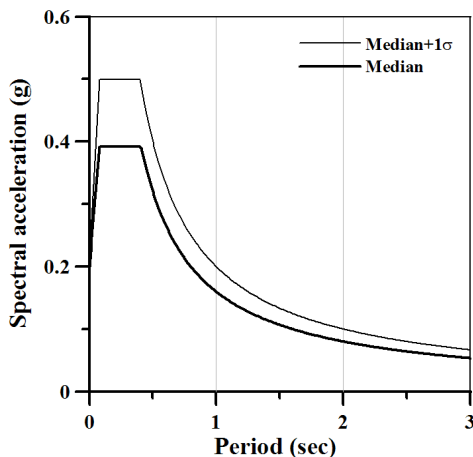


(b) Taft EQ N90E

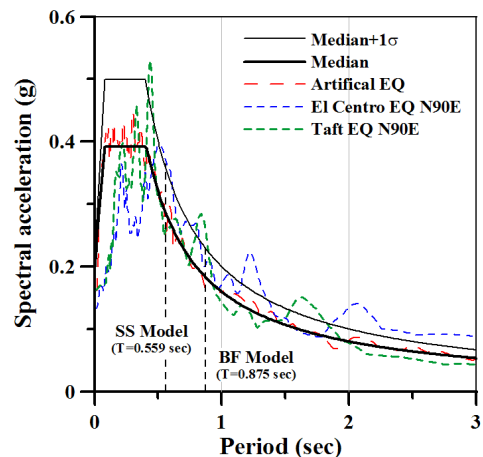


(c) Artificial EQ

그림 6 가속도 시간이력곡선



(a) UBC-97 Zone-2B 설계응답스펙트럼



(b) 조정된 가속도응답스펙트럼

그림 5 가속도응답스펙트럼

조정하는 방법은 다양하지만 유효최대지반가속도가 최대지반 가속도보다 지진하중이 구조물의 응답에 미치는 영향을 잘 반영할 수 있기 때문에 본 논문에서는 유효최대지반가속도로 조정하는 방법을 적용하였다.

4. 취약도를 이용한 RC모멘트저항골조의 내진성능평가

4.1 비선형시간이력해석에 의한 결과

예제구조물의 설계스펙트럼의 크기로 조정된 지진하중은 유효최대지반가속도를 0.1g씩 증가시켜서 지진강도를 나타내는 지진강도 지표로 결정하였다. 각 지진하중의 유효최대지반가속도의 크기를 0.1g씩 점차적으로 증가시켜 비선형시간이력해석을 수행하고 각 경우의 변위응답에서 최대층간변위를 산정하였다. 그리고 최대층간변위율이 각 성능수준의 손상지수를 넘을 손상확률을 평가하였다.

표 5는 해석에서 나온 응답으로 산정된 대수평균값(λ)과 대수표준편차(ζ)를 나타낸다. 위의 결과를 바탕으로 각 손상상태에 대하여 기준이 되는 최대층간변위를 이상의 손상이 일어날 확률을 구하여 취약도를 작성하였다. 지진하중에 대하여 각 구조물이 기준 최대층간변위를 이상의 손상이 일어날 확률은 표 6과 같으며, 이를 바탕으로 작성된 각 구조물의 취약도는 그림 7과 같다. 그림 7에서 점선은 설계수준의

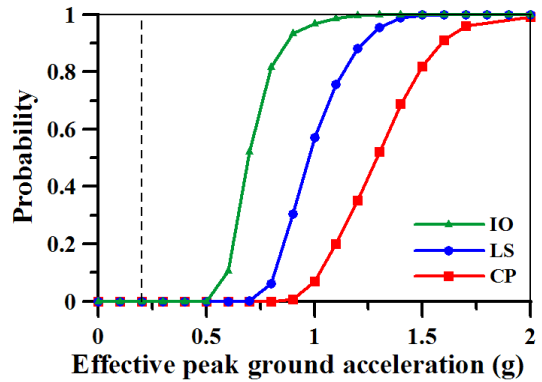
지진하중을 의미한다. 그림 7에서 보면 BF Model의 경우는 설계수준의 지진하중에서 적절한 내진성능을 보유하고 있는

표 6 예제구조물의 초과손상확률(비선형시간이력해석)

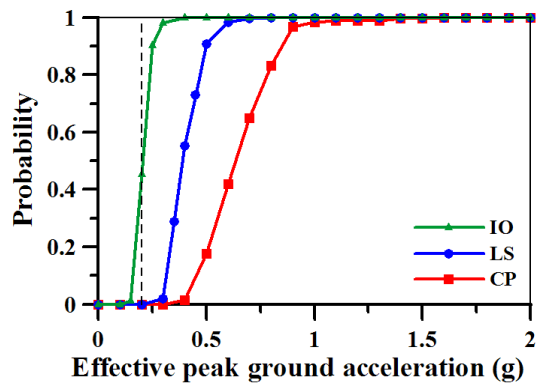
EPA	BF Model			SS Model		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
0.1g	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2g	0.0000	0.0000	0.0000	0.4522	0.0000	0.0000
0.3g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9817	0.0202	0.0000
0.4g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9993	0.5517	0.0139
0.5g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.9082	0.1762
0.6g	0.1075	0.0000	0.0000	0.9999	0.9838	0.4207
0.7g	0.5199	0.0026	0.0000	0.9999	0.9973	0.6480
0.8g	0.8159	0.0630	0.0000	0.9999	0.9995	0.8315
0.9g	0.9332	0.3050	0.0059	0.9999	0.9999	0.9671
1.0g	0.9664	0.5714	0.0694	0.9999	0.9999	0.9834
1.1g	0.9868	0.7549	0.2005	0.9999	0.9999	0.9896
1.2g	0.9969	0.8810	0.3520	0.9999	0.9999	0.9898
1.3g	0.9996	0.9545	0.5199	0.9999	0.9999	0.9898
1.4g	0.9999	0.9878	0.6879	0.9999	0.9999	0.9952
1.5g	0.9999	0.9978	0.8186	0.9999	0.9999	0.9952
1.6g	0.9999	0.9997	0.9115	0.9999	0.9999	0.9979
1.7g	0.9999	0.9999	0.9599	0.9999	0.9999	0.9981
1.8g	0.9999	0.9999	0.9740	0.9999	0.9999	0.9981
1.9g	0.9999	0.9999	0.9865	0.9999	0.9999	0.9981
2.0g	0.9999	0.9999	0.9913	0.9999	0.9999	0.9990

표 5 예제구조물의 최대층간변위를응답 확률분포계수(비선형시간이력해석)

EPA	BF Model		SS Model	
	λ	ζ	λ	ζ
0.1g	-6.5071	0.1285	-6.4155	0.1204
0.2g	-5.8500	0.1943	-6.1249	0.1418
0.3g	-5.4456	0.1413	-5.8217	0.1081
0.4g	-5.2505	0.1034	-5.6428	0.1286
0.5g	-5.0509	0.1135	-5.4590	0.1676
0.6g	-4.8146	0.1688	-5.2510	0.2400
0.7g	-4.5927	0.2438	-5.0878	0.2191
0.8g	-4.3486	0.2852	-4.8675	0.4101
0.9g	-4.0873	0.3449	-4.8146	0.2262
1.0g	-3.8372	0.4188	-4.6488	0.2184
1.1g	-3.6006	0.4518	-4.5246	0.2130
1.2g	-3.3863	0.4455	-4.3962	0.2176
1.3g	-3.1984	0.4212	-4.2161	0.2118
1.4g	-3.0259	0.3946	-4.0571	0.2575
1.5g	-2.8936	0.3572	-3.8933	0.3076
1.6g	-2.7772	0.3275	-3.7318	0.3760
1.7g	-2.6653	0.3166	-3.5848	0.4387
1.8g	-2.4590	0.8356	-3.4661	0.4405
1.9g	-2.4760	0.5022	-3.2597	0.5214
2.0g	-2.4668	0.3157	-3.1612	0.5030



(a) BF Model



(b) SS Model

그림 7 취약도함수(비선형시간이력해석)

며 설계수준 이상의 하중에서도 완전붕괴에 이르는 확률은 적다. 그러나 SS Model의 경우는 설계수준의 지진하중에서는 적절한 내진성능을 보유하고 있으나 설계수준의 지진하중보다 큰 지진하중이 작용한다면 인명안전수준을 넘어서 완전붕괴에 이를 확률이 BF Model에 비하여 확연히 높음을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 SS Model이 연약층을 가지고 있어서 소성변위응답이 1층 기둥에 집중되기 때문으로 판단된다.

4.2 비선형정적해석에 의한 결과

비선형정적해석(Pushover Analysis)을 수행하여 각 구조물의 능력스펙트럼을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(b)의 SS Model의 능력스펙트럼에서 비내력벽의 파괴 이후에 BF Model의 능력스펙트럼보다 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 지진하중의 크기를 단계적으로 증가시켜 변위연성비(μ)에 의한 성능점을 산정하였다. 설계응답스펙트럼, 설계응답스펙트럼에 조정된 3개의 지진하중을 이용하여 각각의 성능점을 산정하고 성능점 수준에서의 최대층간변위률을 산정하여 각 성능수

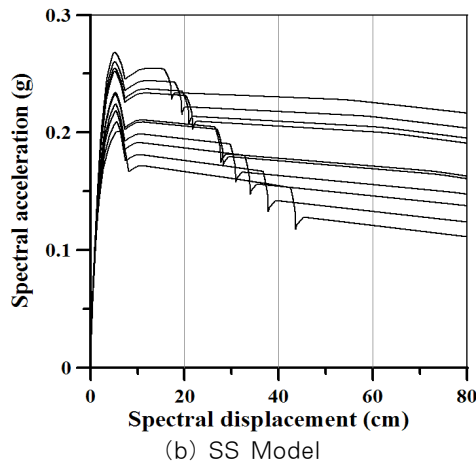
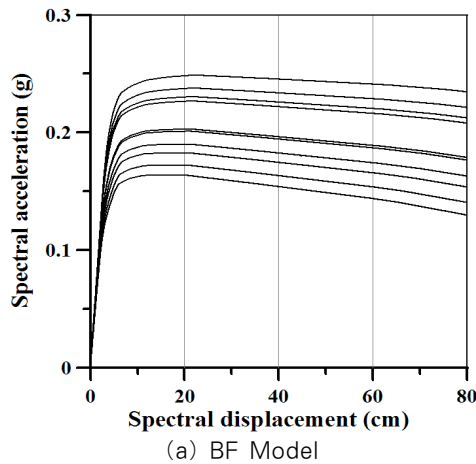


그림 8 예제구조물의 능력스펙트럼(비선형정적해석)

준의 손상지수를 넘을 손상확률을 평가하였다. 비선형시간이력해석과 마찬가지로 해석에서 나온 응답으로 대수평균값(λ)

표 7 예제구조물의 초과손상확률(비선형정적해석)

EPA	BF Model			SS Model		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
0.1g	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0000	0.0000
0.3g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.6985	0.0000
0.4g	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.0007
0.5g	0.0188	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.1685
0.6g	0.9949	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.9964
0.7g	0.9999	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
0.8g	0.9999	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
0.9g	0.9999	0.0000	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.0g	0.9999	0.0853	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.1g	0.9999	0.8289	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.2g	0.9999	0.9982	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.3g	0.9999	0.9999	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.4g	0.9999	0.9999	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.5g	0.9999	0.9999	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.6g	0.9999	0.9999	0.0000	0.9999	0.9999	0.9999
1.7g	0.9999	0.9999	0.0003	0.9999	0.9999	0.9999
1.8g	0.9999	0.9999	0.0136	0.9999	0.9999	0.9999
1.9g	0.9999	0.9999	0.1271	0.9999	0.9999	0.9999
2.0g	0.9999	0.9999	0.4721	0.9999	0.9999	0.9999

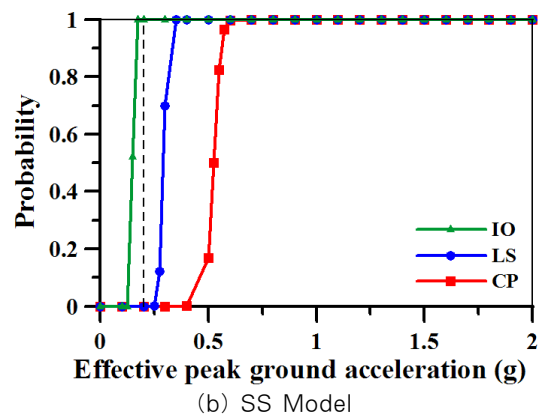
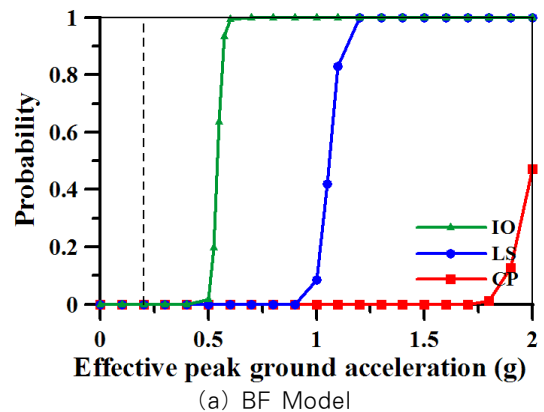


그림 9 취약도함수(비선형정적해석)

과 대수표준편차(ζ)를 구하고 그 결과를 바탕으로 각 손상상태에 대하여 기준이 되는 최대층간변위를 이상의 손상이 일어날 확률을 구하면 표 7과 같으며 취약도곡선은 그림 9에 작성하였다. 그림 7의 결과와 마찬가지로 연약층이 있는 SS Model의 경우에 일반적인 골조인 BF Model보다 설계수준 이상의 하중에서 인명안전수준, 완전붕괴에 이를 손상확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 취약도해석에 의한 결과를 비교하면 연약층이 있는 경우는 골조만 있는 모델보다 낮은 내진 성능수준을 가짐을 확인할 수 있으며 해석 결과로 연약층이 있는 대상건축물의 내진성능은 설계기준에서 제시하고 있는 적정한 수준의 성능을 만족하지 못하며 지진에 취약함을 보여준다. 연약층이 있는 경우는 저층에 소성변형이 집중되고 하부층의 부분적인 붕괴가 전체 시스템의 붕괴 원인의 가능성을 가진다고 할 수 있다. 그러므로 부분적으로 비내력벽을 가지고 있는 건물의 경우에는 설계시 비내력벽을 고려하지 않는다면 심각한 지진피해를 받을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진하중과 구조물 재료특성의 불확실성을 고려하고 구조설계시 건물의 모형화에서 무시되는 비내력벽을 등가의 대각압축스트럿으로 모형화하여 지진취약도 해석을 하였다. 그리고 유효최대지반가속도를 이용하여 각 건축물에 대하여 지진취약도를 작성하였다.

비내력벽의 유무에 따른 RC구조물의 취약도함수를 산정한 결과, 연약층을 가지고 있는 대상건축물의 손상확률이 골조만 있는 경우보다 크며 해석방법의 차이에 따라서 취약도함수의 형태가 달라질 수 있음을 확인하였다. 연약층이 있는 경우는 상부층은 큰 소성거동없이 1층의 기둥에서만 집중적으로 발생하여 국부적인 손상이 나타났으며, 내진성능은 설계기준에서 제시하고 있는 적정한 수준의 성능을 만족하지 못하여 지진에 취약함을 보여줬다.

그러므로 부분적으로 비내력벽을 가지고 있는 건물의 경우에는 설계시 비내력벽을 고려하지 않는다면 심각한 지진피해를 받을 수 있는 확률이 크며 내진성능평가는 비내력벽의 영향을 고려하여 지진거동을 평가하여야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 3개의 지진하중, 콘크리트의 압축강도만을 확률변수로 하였으나 다양한 확률변수를 사용한다면 보다 정확한 취약도함수를 작성할 수 있을 것이다. 향후 HAZUS에서 제시하는 비내력벽을 가진 철근콘크리트골조의 취약도곡선과 비교하여 해석결과의 적정성을 평가하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-313-D01137)이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박주남, 최은수** (2007) 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가, 한국지진공학회 논문집, 11(3), pp.11~21.
- 정우영, 오금호, 임중혁, 이정환** (2009) 역량스펙트럼 해석에 의한 저층 RC건축물의 지진취약도함수 매개변수 분석, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.300~307.
- FEMA** (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356, Washington, D.C.
- International Conference of Building Officials** (1997) Uniform Building Code, UBC-97, California.
- Kwon, O.S., Amr Elnashai** (2006) The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure, *Engineering Structures*, 28, pp.289~303.
- Matjaž Dolšek, Peter Fajfar** (2002) Mathematical modelling of an inlled RC frame structure based on the results of pseudo-dynamic tests, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 31, pp.1215~1230.
- Murat Serdar Kircil, Zekeriya Polat** (2006) Fragility analysis of mid-rise R/C frame buildings, *Engineering Structures*, 28, pp.1335~1345.
- Newmark, N.M., Hall, W.J.** (1982) Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., pp.35~36.
- NZSEE** (2006), Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes, New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Sihghal, A., Kiremidjian, A.S.** (1996) Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, *Journal of Structural Engineering*, 122(12), pp.1459~1467.