

FEMA P695를 이용한 격간벽 구조의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Staggered Wall Structures Using FEMA P695

이준호¹⁾ · 강현구²⁾ · 이민희³⁾ · 김진구⁴⁾

Lee, Joon Ho · Kang, Hyun Goo · Lee, Min Hee · Kim, Jin Koo

국문 요약 >> FEMA P695은 설계지진하중에 대한 구조물의 붕괴 안전성 및 내진성능계수의 적절성을 검토할 수 있는 방법론을 제시하고 있다. 본 연구에서는 FEMA P695에 제시된 방법에 따라 6층, 12층 중복도 격간벽 구조시스템의 내진성능을 파악하였다. 구조설계 기준에 따라 설계된 기본 모델의 해석결과와 중복도 상부 인방보의 춤이나 철근량을 증가시킨 모델의 해석결과를 비교하여 보강 효과를 파악하였다. 두 예제 구조물의 중분 동적해석 결과를 바탕으로 계산된 수정 붕괴 여유비 (ACMR)는 제시된 ACMR_{20%} 한계상태를 만족하여 설계지진하중에 대하여 충분한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 인방보의 춤을 증가시킨 모델에 비해 주철근을 증가시킨 모델의 ACMR 증가량이 더 현저하여 보다 효율적인 내진성능 보강방안으로 나타났다.

주요어 FEMA P695, ATC 63, 내진성능평가, 중분 동적해석, 격간벽

ABSTRACT >> The FEMA P695 document proposed a methodology to evaluate the collapse safety of a structure and the validity of the seismic design coefficients. In this study, the seismic performance of six- and twelve-story staggered wall structures with a middle corridor was evaluated based on the FEMA P695 procedure. The analysis results of the prototype structures were compared with those of the structures with an increased coupling beam depth or an increased re-bar ratio of the coupling beams in order to investigate the effect of retrofit. The adjusted collapse margin ratios (ACMR) of the model structures obtained from incremental dynamic analyses turned out to be larger than the specified limit states of an ACMR of 20%, which implies that the analysis model structures have enough strength against design level earthquakes. It was also observed that the increase in the re-bar ratio of the coupling beams between the staggered walls was more effective in increasing the ACMR than an increase in the depth of the coupling beams.

Key words FEMA P695, ATC-63, Seismic Performance Evaluation, IDA, Staggered Wall

1. 서론

공동주택 구조의 가변성에 따른 주택성능등급제 시행 및 발코니 확장 허용 등 정책 변화에 따라 아파트 구조형식은 일반적인 벽식 구조에서 리모델링이 용이한 가변형 구조로 전환되는 추세에 있다.^{(1),(2)} 국내 공동주택의 대부분을 차지

하는 벽식 구조시스템은 복잡하고 다양한 내력벽의 배치로 인해 가변성 확보가 어렵다. 또한 모멘트 저항골조(Moment Resisting Frame)의 경우 기둥을 연결하는 거더(Girder)에 의해 층고가 높아져 층고 및 공사비가 증가하는 경향이 있다. 격간벽 구조시스템은 전단벽을 격 층으로 설치함으로써 구조물량을 절감하고 가변성을 확보할 수 있는 장점이 있어 실무 적용 가능성에 관하여 연구가 진행되고 있다. 최근 이준호 등⁽³⁾은 편복도형 판상형 격간벽구조물의 내진성능 및 반응수정계수를 평가하였으며, 해석모델의 층 수 및 지진하중의 크기에 따라 약 2~3 정도의 연성도 계수 및 초과강도를 갖는 것으로 나타났다. 또한 강현구 등⁽⁴⁾은 비선형 정적 해석을 통해 중복도 판상형 격간벽구조물의 내진성능과 붕괴메커니즘을 분석하였고, 시스템 연성계수를 확보하기 위한 방안을 연구하였다. 본 연구에서는 통행 공간을 확보하

¹⁾ 정희원·성균관대 대학원, 박사과정

²⁾ 정희원·성균관대 대학원, 석사과정

³⁾ 성균관 대학원, 석사과정

⁴⁾ 정희원·성균관대 건축공학과, 정교수

(교신저자: jkim12@skku.edu)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 3. 12 / 수정일 1차: 2012. 4. 27, 2차: 2012. 5. 29 / 게재확정일 : 2012. 5. 29)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

기 위해 중앙 복도가 설치된 격간벽 구조의 내진성능을 파악하기 위하여 6층, 12층의 격간벽 구조시스템 설계하고 붕괴 메커니즘 분석을 통해 인방보의 휨강성과 철근량을 증가시킨 보강방안의 내진성능을 FEMA P695에 의해 분석하였다.

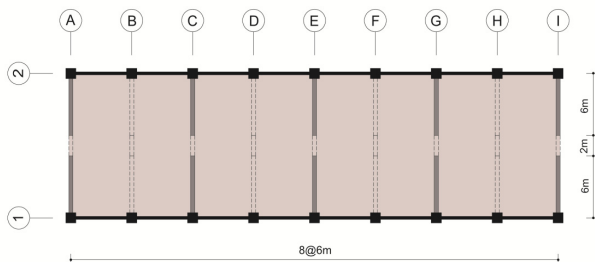
2. 격간벽 구조시스템

2.1 격간벽 구조시스템의 일반사항

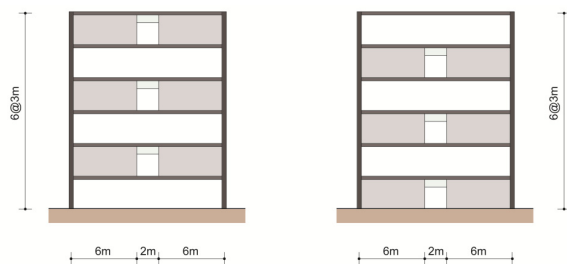
층마다 벽체를 엇갈려 배치한 격간벽 구조시스템에는 벽체가 격 층(Alternate Floor)으로 존재하므로 건축 계획상의 유연성을 확보할 수 있다 (그림 1). 중력하중에 대하여 벽체가 상부슬래브 및 하부슬래브와 함께 격간벽을 중심으로 양측의 슬래브 중심간 거리를 유효폭으로 하는 H형 단면의 깊은 보로 거동하여 구조적 안정성을 확보한다. 격간벽의 직각 방향으로는 모멘트골조와 같이 거동한다. 격간벽 구조시스템의 기둥에 비하여 격간벽의 휨 강성이 매우 크기 때문에 휨 변형은 주로 기둥에서 발생하고, 횡하중은 바닥 슬래브를 통해 인접 기둥 및 전단벽으로 전달된다.



〈그림 1〉 중복도 격간벽 구조시스템



〈그림 2〉 평면도



〈그림 3〉 입면도

2.2 예제 구조물의 설계

통행 공간을 확보하기 위해 중앙 복도가 있는 격간벽 구조의 내진성능을 파악하기 위하여 6층(SWC06), 12층(SWC12)의 격간벽 구조를 설계하였다. x(장변)방향은 모멘트 저항골조(MRF)로 구성하였고, y(단변)방향으로는 6m 길이의 벽체를 격 층으로 배치하고, 격간벽은 인방보(Coupling Beam)를 사용하여 연결하였다. 설계하중은 KBC-2009⁵⁾를 적용하였으며 고정하중은 7kN/m², 활하중은 숙박시설 객실에 해당하는 2kN/m²을 적용하였다. 지진하중과 풍하중을 산정하기 위한 계수는 표 1과 표 2에 나타내었다. 격간벽은 형태면에서 수직적으로 불연속이나 구조적으로는 깊은 보와 같이 거동하기 때문에 수직불연속 비정형에 해당하지 않는 것으로 판단하였으며, 특별지진하중은 적용하지 않았다.

AISC Design Guide 14 : Staggered Truss Framing Systems⁶⁾에서는 격간벽 구조시스템이나 스테저드 트러스 시스템의 설계 및 해석 시 슬래브는 강막(Rigid Diaphragm)으로 가정하였으며, 본 연구에서도 슬래브의 두께 (21cm)와 폭 (14m)을 고려하여 강막으로 가정하였다. 격간벽 구조시스템의 경우 내진설계기준에 지진력 저항시스템으로 분류되어 있지 않으므로 기타구조로 간주하여 반응수정계수는 3.0을 적용하였다. 설계에 사용된 콘크리트의 강도는 27MPa이며 철근은 SD400을 사용하였고, 철근 콘트리트 부재의 설계는 KBC-2009⁵⁾를 따랐다. 격간벽의 두께는 모든 모델에서 200mm이며, 격간벽 사이의 연결보는 200×600mm로 설계하였다. 부재의 크기 및 배근 상세는 기존 논문⁴⁾에 제시되어 있다.

〈표 1〉 KBC-2009에 따른 지진하중 변수

지역계수 (S)	0.22
지반종류	S _b
F _a	1.00
F _v	1.00
S _{DS}	0.367 g
S _{D1}	0.147 g
중요도계수 (I)	1.2
반응수정계수 (R)	3
내진설계범주	C

〈표 2〉 KBC-2009에 따른 풍하중 변수

노풍도	B
설계기본풍속	30 m/sec
중요도계수	1.0
가스트계수	2.2

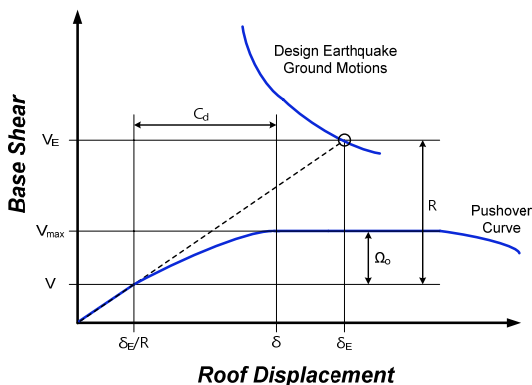
3. FEMA P695에 의한 내진성능평가

3.1 평가절차

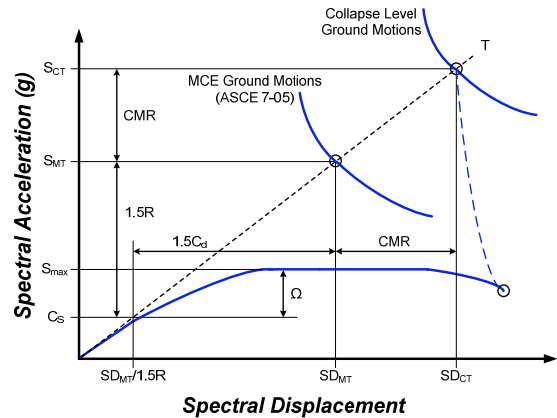
ATC-63에서는 현재 내진기준에 제시되어 있지 않은 구조시스템이나 새로 개발된 구조부재를 횡하중 저항시스템에 사용한 구조물의 내진성능계수를 결정할 수 있는 합리적인 방법론인 FEMA P695⁽⁷⁾를 제시한다. 기존에 있는 구조시스템 또는 새롭게 제안된 구조시스템에 대하여 현행 내진기준에서 정하고 있는 동일한 안전율을 확보하도록 하는 반응수정계수와 같은 내진성능계수를 보다 합리적으로 결정할 수 있다. FEMA P695에서는 NEHRP Recommended Provisions과 ASCE/SEI 7-05⁽⁸⁾와 같은 내진성능계수를 사용하며, 500년 재현주기 지진에 대한 인명안전(Life Safety) 성능 목표를 기준으로 한다. 이는 약 2500년 재현주기 지진(MCE; Maximum Considered Earthquake Ground Motion)에 대해 지진력 저항 시스템이 낮은 붕괴 확률을 갖도록 함으로써 인명안전 (Life Safety)의 성능 목표를 달성하도록 한다.

ATC-63에서는 ATC-19⁽⁹⁾, ATC-34⁽¹⁰⁾에 의한 내진성능계수(Seismic Performance Factor)와 비선형 정적해석(Pushover)의 개념은 그대로 준용하며, 그림 4와 같이 내진성능계수는 반응수정계수(R Factor), 변위증폭계수(C_d Factor), 초과강도계수(Ω_o factor)로 구성된다. MCE 수준의 지진에 대한 안전율은 붕괴여유비(CMR; Collapse Margin Ratio)에 의해 평가되며, CMR은 비선형 증분동적해석(IDA; Incremental Dynamic Analysis)을 통해 다음 식 (1)과 같이 \widehat{S}_{CT} 와 S_{MT} 의 비로 정의된다.

$$CMR = \frac{\widehat{S}_{CT}}{S_{MT}} = \frac{SD_{CT}}{SD_{MT}} \quad (1)$$



〈그림 4〉 Pushover곡선을 이용한 내진성능계수의 정의



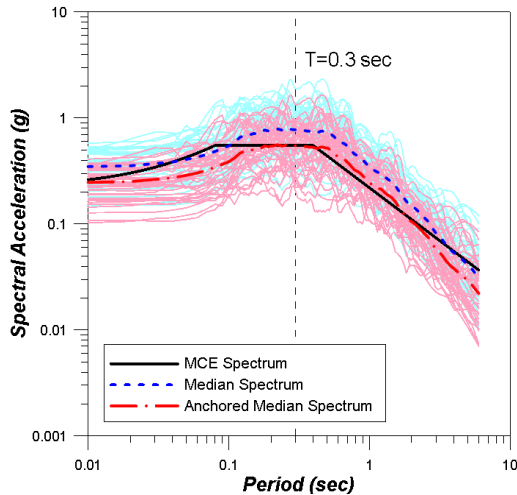
〈그림 5〉 ATC-63의 내진성능계수와 CMR

여기서 \widehat{S}_{CT} 는 총 22쌍의 스케일링된 지반 가속도의 강도를 증가시키면서 IDA 해석을 수행하고, 절반(22개)의 지반 가속도에 대해서 구조시스템에 한계상태를 유발하는 지진기록의 가속도를 의미한다. S_{MT} 는 MCE 수준의 스펙트럼에서 대상 구조물의 주기에 해당하는 가속도이다.

그림 5는 구조시스템의 비선형 거동과 MCE 수준의 지진하중과의 관계를 명확하게 보이기 위하여 Pushover형태의 그림을 5% 고유감쇠비를 가정한 스펙트럼 좌표계로 치환한 그래프이다. 그래프 상의 1.5라는 계수는 DBE(Design Based Earthquake)에 대한 MCE 수준의 스펙트럼 가속도의 비로부터 유추된 값이며, FEMA P695는 MCE 수준의 지진에 대하여 안전율을 평가하는 방식으로 구조시스템의 내진성능 계수를 산정한다. CMR은 사용한 지진파, 내진설계시의 변수, 해석시의 변수, 구조물 시공 시 발생 가능한 변수 등을 비롯한 다양한 인자들에 의해 영향을 받지만, FEMA P695에서는 취약도 곡선(Fragility Curve)를 이용하여 통합적으로 변수들의 영향을 평가한다.

3.2 지진기록의 선정 및 스케일링

구조시스템의 비선형 응답을 평가하기 위해 지진 데이터가 필요하며 FEMA P695는 PEER NGA Database⁽¹¹⁾를 통해 22쌍의 Far-Field 지진 데이터 군을 제공하고 있다. 각 지진 기록별 규모, 진원과의 거리, 지반조건 등이 다르며 이러한 불확실성을 제거하기 위해 22쌍의 지진 데이터는 FEMA P695의 식 (A-2)에 의해 정규화 과정을 거치게 된다. 정규화된 22쌍 지진기록의 대표값(Representative Value)과 지반조건에 따른 MCE 스펙트럼을 해당 구조물의 주기에 44개 지진기록의 스펙트럼을 “Anchoring”하여 지진기록을 스케일링 한다(그림 6).



〈그림 6〉 지진기록의 스케일링

3.3 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 다음 식 (2)와 같은 중력하중을 미리 재하하고 횡하중을 가력하고 ASCE/SEI 41-06의 절차에 따라 비선형 정적해석을 수행한다.

$$1.05(Dead Load) + 0.25(Live Load) \quad (2)$$

그림 7은 이상화된 비선형 정적해석 곡선이며, 초과강도 계수(Ω)와 주기기반 연성도(μ_T)는 식 (3), (4)와 같다.

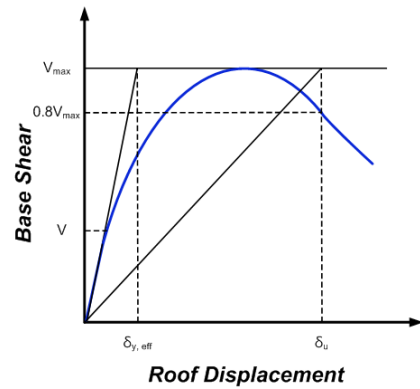
$$\Omega = \frac{V_{max}}{V} \quad (3)$$

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \quad (4)$$

여기서 최대변위(δ_u)는 구조물의 최대 밀면전단력의 80% 되는 지점 ($0.8 V_{max}$)에 해당하는 변위이며, 유효 항복변위 ($\delta_{y,eff}$)는 FEMA P695 식 (6), (7)에 의해 계산하였다.

3.4 비선형 동적해석

방법론에서 언급한 바와 같이 총 22쌍의 스케일링된 지반 가속도의 강도를 증가시키면서 IDA해석을 수행하고, 절반(22개)의 지반 가속도에 대해서 구조시스템에 한계상태를 유발하는 지진기록의 가속도($\widehat{S_{CT}}$)를 산정한다. 이와 같은 방식은 Vamvatsikos와 Cornell⁽¹²⁾이 제안한 증분동적해석 (IDA; Incremental Dtnamic Analysis)과 유사한 개념이라 할 수 있지만, 최초 22개의 지반가속도에 대해서 구조시스



〈그림 7〉 이상화된 비선형 정적해석 곡선

템이 한계상태에 도달했을 때까지만 해석을 수행한다는 점에서 해석시간을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

구조물의 붕괴 저항성능이나 CMR은 해석에 사용된 지진기록의 주파수 성분(Spectral shape)에 큰 영향을 받으며, 이러한 영향을 보정하기 위해 스펙트럼 형상계수(SSF; Spectral Shape Factor)를 이용한다. 스펙트럼 형상계수는 지진파의 스펙트럼 형상의 다양성과 구조물이 보유한 연성 능력, 주기에 따른 응답의 특성 등을 반영하기 위한 계수로서 T , μ_T , 내진설계범주에 따라 다른 값을 갖게 되는데, FEMA P695, Table 7-1a, b에 의한 스펙트럼 형상계수를 이용하여 앞서 구한 예제 구조물의 붕괴여유비(CMR)를 ACMR(Adjusted Collapse Margin Ratio)로 수정한다.

$$ACMR = SSF \times CMR \quad (5)$$

예제 구조물의 ACMR이 FEMA P695에서 제시한 ‘기준 ACMR’(Acceptable Values of ACMR)을 만족하는지 평가하기 위해 전체 시스템 불확실성(β_{TOT} ; Total System Uncertainty)을 고려하여 기준 ACMR을 결정한다. 기준의 완성도, 실험데이터의 질적 수준, 지반진동이력의 다양성, 비선형 모델에 내포된 불확실성을 보정하기 위한 지표로써 전체 시스템 붕괴 불확실성(β_{TOT})을 FEMA P695, 식 (6-7)에 의해 계산하도록 제안하고 있으나 FEMA P695, Table 7-2a~d에 의해 사용자가 직관적으로 구할 수 있다. 결정된 β_{TOT} 는 FEMA P695 Table 7-3에 정리되어 있는 ‘기준 ACMR’(Acceptable Values of ACMR)을 결정하는데 사용된다. β_{TOT} 에 따라 붕괴확률이 10%, 20%일 때의 기준 ACMR($ACMR_{10\%}$, $ACMR_{20\%}$)을 결정할 수 있고, 성능 그룹별 계산된 ACMR의 평균값은 $ACMR_{10\%}$ 이상이어야 하며, 성능 그룹의 각 개별 대상구조물의 계산된 ACMR은 $ACMR_{20\%}$ 이상이어야 한다.

4. 격간벽 구조시스템의 내진성능평가

비선형 해석에 사용된 기둥의 이력모델은 ASCE/SEI 41-06에 제시되어 있는 Cord-Rotation방식에 따라 정의하였고, 콘크리트의 인장강도는 무시하였다. 재료의 초과강도를 고려하여 콘크리트의 압축강도는 1.5배, 철근의 항복강도는 1.25배를 적용하였다(그림 8).

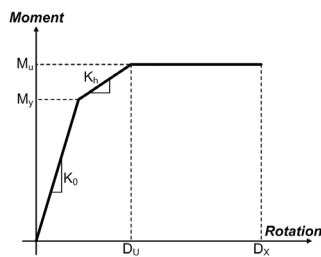
벽체는 내진상세가 적용되지 않았으므로 콘크리트의 구속효과는 적용하지 않았고, “Shear wall”요소를 사용하여 PERFORM 3D로 비선형해석을 수행하였다. Paulay and Priestley⁽¹⁴⁾에 따라 벽체 콘크리트 재료의 응력-변형률 관계를 정의하였다. 콘크리트의 인장강도는 무시하였고, 압축강도는 3선형으로 비선형 이력거동을 정의하였다. 균열에 의한 항복강도(F_y)는 최대 압축강도의 60%, 잔류변형강도(Residual strength)는 최대 압축강도의 20%로 하였다. 또한 최대 압축강도에서의 변형률은 0.002, 극한 변형률은 0.004로 하였다(그림 9).

인방보는 두 개의 탄성 보 요소, 강도 저감을 고려한 양단의 Moment Hinge(Rotation Type)와 중앙의 Shear Hinge(Plastic Strain Type)로 구성하였다(그림 10). Moment hinge는 ASCE/SEI 41-06에 따라 정의하였고, Shear hinge는 Englekirk⁽¹⁵⁾가 제안한 식을 이용하였다. 인방보의 공칭 모멘트 강도(M_n)로부터 초과강도를 고려한 모멘트 강도(Probable Flexural Strength, M_{pr})를 산정하고, M_{pr} 을 통해 다음 식과 같이 인방보의 소요 전단강도를 계산한다.

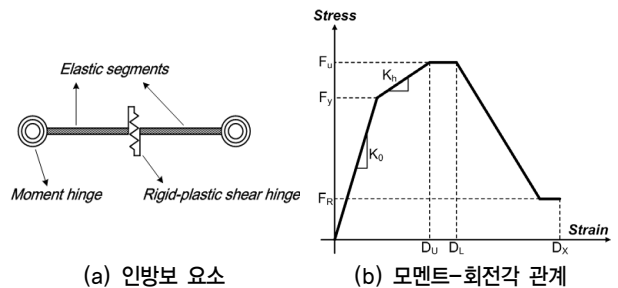
$$V_u = \frac{2M_{pr}}{L} \tag{6}$$

기존 연구결과⁽⁴⁾에 따르면 중복도 격간벽 구조시스템은 설계 밀면전단력보다 큰 최대강도를 가지며, 두 개 이상의 인접층 인방보에 과도한 소성변형이 발생할 경우 구조물의 내력이 급감하였다. 그러므로 중복도 격간벽 구조시스템의 내진성능을 향상시키기 위해 인방보의 춤을 60cm에서 75cm로 25% 증가시킨 모델(SWC06 LI100, SWC12 LI100)과 평형철근비를 만족하는 범위 내에서 인방보의 철근량을 50% 증가한 모델(SWC06 LAs50, SWC12 LAs50)의 지진 거동을 비교하였다. 6층, 12층 중복도 격간벽 구조시스템(SWC06, SWC12)과 SWC06 LI100, SWC12 LI100, SWC06 LAs50, SWC12 LAs50의 비선형 정적해석에 의한 하중-변위 곡선에 설계 밀면전단력, 인방보에 처음 소성힌지가 발생한 지점, 최대 밀면전단력 등을 그림 11에 나타내었다. 인방보의 춤이 증가된 예제 구조물의 경우 초기 강성이 약간 높지만, 인방보의 철근량이 50% 증가된 예제 구조물과 이력거동에는 큰 차이가 없다. 건축 계획 상 인방보의 춤은 치수의 제한이 있으므로 인방보의 단면적을 증가시켜 휨강성을 증가시키는 방안 보다 철근량을 증가시키는 방안이 보다 효율적이다. FEMA P695에 의한 내진성능평가를 위해 초과강도계수(Ω)와 주기기반 연성도(μ_T)를 앞서 언급한 식 (3)과 (4)를 이용하여 표 3에 나타내었다.

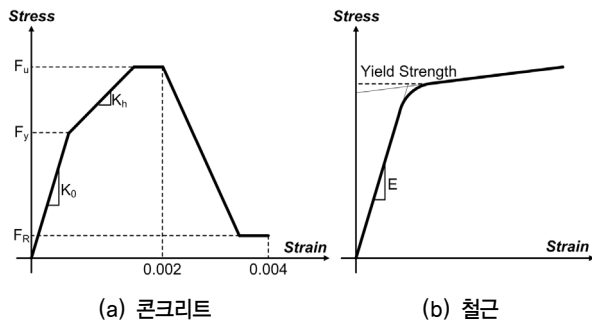
붕괴여유비 CMR을 구하기 위해 증분동적해석을 수행하



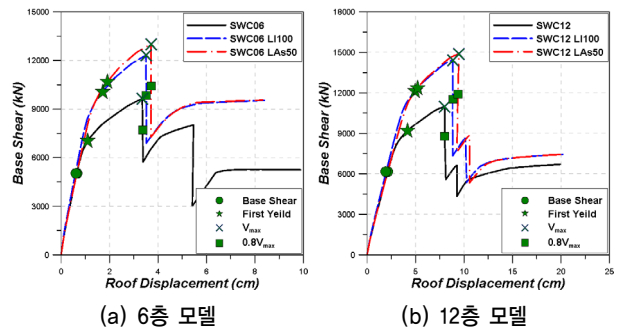
〈그림 8〉 Frame column plastic hinge



〈그림 10〉 인방보의 모델링



〈그림 9〉 벽체의 재료 비선형모델



〈그림 11〉 비선형 정적해석 결과

여 스케일링된 22쌍의 Far-Field 지진 데이터 군을 이용하여 증분동적해석(IDA; Incremental Dynamic Analysis)을 수행하였다. 비선형 동적해석을 위해 감쇠비는 모든 모드에 대해 5%로 가정하였고, 편칭효과는 고려하지 않았다.

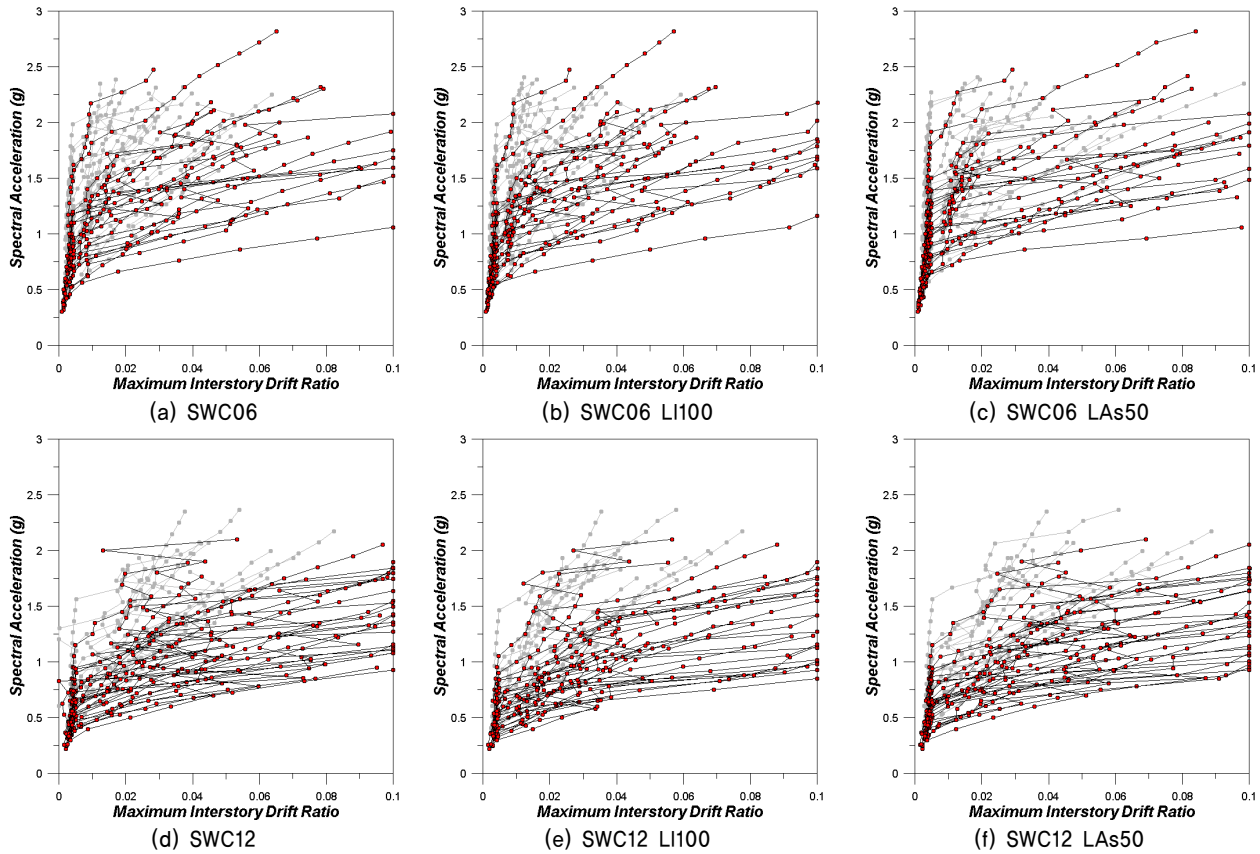
〈표 3〉 초과강도계수(Ω)와 주기기반연성도(μ_T)

	Ω	μ_T
SWC06	1.915	4.445
SWC06 LI100	2.446	4.279
SWC06 LAs50	2.585	3.649
SWC12	1.782	3.305
SWC12 LI100	2.343	3.201
SWC12 LAs50	2.417	3.005

그림 12는 각 예제 구조물에 대한 증분동적해석 결과이며 22개의 지반 가속도에 대해서 구조시스템에 동적 불안정을 유발하는 지진기록의 가속도(\widehat{S}_{CT})를 산정하고 식 (1)에 의한 CMR을 계산하였다(표 4).

동적 불안정은 과도한 횡변위가 발생하여 P- Δ 효과로 인해 스펙트럼 가속도의 증가 없이 최대 층간변위각이 지속적으로 증가하기 시작한 지점이며 Vamvatsikos와 Cornell⁽¹²⁾의 연구결과에 따라 IDA그래프 곡선상의 초기 기울기가 20% 되는 지점으로 정의하였다.

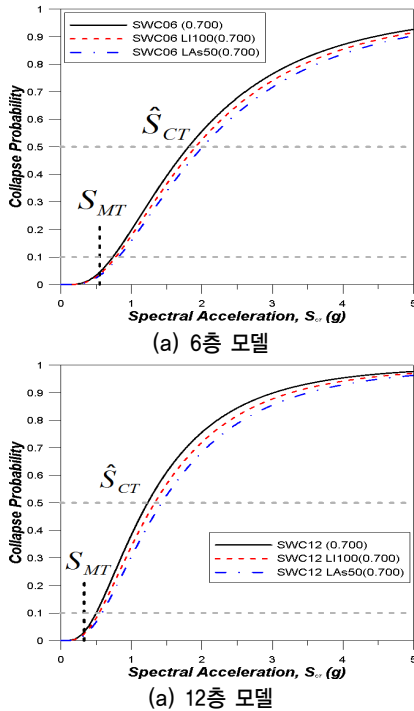
6층과 12층 예제 구조물은 동일한 조건으로 설계되었으므로 β_{TOT} 와 ‘기준 ACMR’(Adjusted Collapse Margin Ratio)은 모두 같은 값으로 가정하였다. 원형모델의 등급



〈그림 12〉 중복지도 격간벽 구조시스템의 증분동적해석

〈표 4〉 예제 구조물의 CMR과 ACMR

	\widehat{S}_{CT}	CMR	SSF	ACMR	β_{TOT}	$ACMR_{20\%}$	Pass/Fail
SWC06	1.809	3.289	1.094	3.598	0.700	1.80	Pass
SWC06 LI100	1.909	3.471	1.093	3.794	0.700	1.80	Pass
SWC06 LAs50	2.009	3.653	1.093	3.993	0.700	1.80	Pass
SWC12	1.229	3.687	1.096	4.041	0.700	1.80	Pass
SWC12 LI100	1.329	3.987	1.094	4.362	0.700	1.80	Pass
SWC12 LAs50	1.429	4.287	1.090	4.673	0.700	1.80	Pass



〈그림 13〉 예제 구조물의 취약도 곡선

은 Good, 실험데이터 등급은 Poor, 설계요구조건 등급은 Good을 적용하여 FEMA P695 Table 7-2a~d에 따라 β_{TOR} 는 0.700으로 정하였다.

방법론에 의한 증분동적해석 결과 인방보의 춤을 25% 증가시킨 예제 구조물과 철근량을 50% 증가시킨 예제 구조물의 \hat{S}_{CT} 는 SWC06, SWC12에 대해 각각 10%, 20%증가하였다. 또한 SSF를 고려하여 계산된 ACMR은 제시된 기준 ACMR_{20%}을 모두 만족하였다.

그러나 비선형 정적해석 결과 인방보 춤을 25% 증가시킨 예제 구조물과 철근량을 50% 증가시킨 예제 구조물의 이력거동은 큰 차이가 없었으나, 인방보 춤을 25% 증가시킨 모델의 계산된 ACMR은 6층의 경우 19.6%, 12층은 32.1% 증가하였고, 철근량을 증가한 모델의 경우 6층과 12층은 각각 36.4%, 60%증가하여 더 큰 붕괴여유비를 보유함을 알 수 있다. 또한 초기 가정한 반응수정계수보다 큰 반응수정계수를 사용한 설계가 가능하다. 그림 12의 증분동적 해석 결과를 이용하여 \hat{S}_{CT} , $\beta_{TOR} = 0.700$ 에 대한 예제 구조물의 취약도 곡선을 그림 13에 나타내었고, 취약도 곡선은 Ellingwood¹⁶⁾에 의해 제시된 식 (7)을 이용하였다.

$$P[C < D | SI = x] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\hat{C}/\hat{D})}{\sqrt{\beta_{DSI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}} \right] \quad (7)$$

여기서, $\Phi[\]$ 은 표준 정규 분포의 면적(Standard Normal Probability Integral), \hat{C} 는 22개의 지반 가속도에 대해서 예제 구조물에 동적불안정을 유발하는 지진기록의 가속도 (\hat{S}_{CT}), \hat{D} 는 구조물의 소요 스펙트럼 가속도, $\sqrt{\beta_{DSI}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}$ 는 전체 시스템 불확실성(β_{TOR})이다.

FEMA P695에서는 MCE수준의 지진기록에 대해 낮은 붕괴확률을 가지도록 규정하며, S_{MT} 의 지진강도에서 10% 붕괴확률을 초과할 경우, 설계 시 가정한 반응수정계수를 사용하지 못하도록 하고 있다. 모든 예제 구조물의 S_{MT} 에 해당하는 붕괴확률은 10%를 초과하지 않으며, 초기 가정한 반응수정계수는 적합함을 알 수 있다. 6층, 12층 기본 구조물에 대해 LI100, LAs50의 취약도 곡선은 완만해지며, 붕괴확률 50%에 해당하는 스펙트럼 가속도가 커지므로 CMR은 증가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 6층, 12층 중복도 격간벽 구조시스템을 설계하고, 붕괴 메커니즘 분석을 통해 인방보의 휨강성과 철근량을 증가시킨 FEMA P695에 의한 예제 구조물의 내진성능평가를 수행하였다.

비선형해석 결과 격간벽 구조시스템은 설계 밀면전단력보다 큰 최대강도를 가지며, 두 개 이상의 인접층 인방보에 과도한 소성변형이 발생할 경우 구조물의 내력이 급감하는 붕괴 메커니즘을 보였다. 모든 예제 구조물의 SSF를 고려하여 계산된 ACMR은 제시된 기준 ACMR_{20%}을 모두 만족하여, 더 큰 반응수정계수를 사용하여 설계할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 인방보 춤을 최대 (75cm)로 증가시킨 모델과 인방보 주철근을 최대 (50%)로 증가시킨 모델의 초과강도계수(Ω)는 두 보강방안의 증가율이 비슷하지만, 주철근을 50% 증가시킨 모델의 ACMR 증가량이 더 크므로 보다 효율적인 내진성능 보강방안인 것으로 나타났다. 따라서 인방보나 기둥 등 소성변형이 집중되는 부재에 특별지진하중을 적용하여 좀 더 강하게 설계함으로써 격간벽 구조의 내진성능을 효과적으로 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015734)

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준, 2005.
2. 건설교통부, 주택성능등급표시제, 2006.
3. 이준호, 전용, 김진구, “판상형 격간벽시스템의 반응수정계수,” 대한건축학회논문집, 제27권, 제7호, 77-85, 2011.
4. 강현구, 이준호, 김진구, “중복도 격간벽 구조시스템의 내진성능평가,” 대한건축학회논문집, 제27권, 제9호, 77-84, 2011.
5. KBC-2009, 건축구조설계기준, 대한건축학회, 2009.
6. AISC, “Steel Design Guide 14 : Staggered Truss Framing System,” American Institute of Steel Construction, Chicago, 2002.
7. FEMA P695, Quantification of Building Seismic Performance Factors, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2009.
8. ASCE, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Reston Virginia., 2007.
9. ATC, Structural response modification factors, ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California, 5-32, 1995.
10. ATC, A critical review of curent approaches to earthquake-resistant design, ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California, 31-6, 1995.
11. PEER, PEER NGA Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, U.S.A., <http://peer.berkeley.edu/nga/>, 2006.
12. Vamvatsikos, D., and Cornell, C.A., “Incremental Dynamic Analysis,” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, Issue 3, pp. 491-514., 2002.
13. Computer and Structures, Inc., PERFORM Components and Elements for PERFORM 3D and PERFORM-Collapse ver.4, CSI, Berkerley, CA., 2006.
14. Paulay and Priestley, “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building,” John Wiley & Sons, Inc., 1992.
15. Englekirk, R. “Seismic design of reinforced and precast concrete buildings,” John Wiley & Sons, Inc., 2003.
16. Ellingwood, B. R., Celik, O. C., and Kinali, K., "Fragility assessment of building structural systems in Mid-America." Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol.36, No.13, 1935-1952., 2007.