

무량복합 및 벽식 구조시스템의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Flat Column Dry Wall System and Wall Slab System Structures

강 현 구* 이 민 희* 김 진 구†
Kang, Hyungoo Lee, Minhee Kim, Jinkoo

요 지

본 논문에서는 벽식 구조시스템의 일부 전단벽을 제거하여 공간의 가변성을 높인 무량복합 구조시스템의 내진성능을 ATC-63에 제시되어 있는 절차에 따라 파악하였으며, 동일한 규모의 벽식 구조시스템의 내진성능과 비교하였다. 해석모델로 12층 무량복합 및 벽식 구조시스템을 KBC 2009에 따라 설계하고 비선형 정적 및 비선형 증분 동적해석(IDA)을 수행하여 지진응답 및 붕괴거동을 파악하였다. 무량복합 시스템은 벽식 구조시스템 보다 적은 양의 콘크리트 물량으로 설계되었으며, 동일한 지진하중에 대하여 좀 더 큰 변위응답을 보이는 것으로 나타났다. IDA 해석결과 얻어진 붕괴 여유비(CMR)는 ATC-63에 제시된 한계상태를 만족하여 설계지진하중에 대하여 충분한 내진성능을 보유한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 무량복합 구조시스템, 비선형거동, ATC-63, 내진성능계수, 유효보폭

Abstract

In this paper the seismic performance of a flat plate wall system structure was evaluated based on the ATC-63 approach, and the results were compared with those of a wall slab structure having the same size. As analysis model structures, a twelve story flat plate wall structure and a wall slab structure were designed based on the KBC-2009, and their seismic performances and collapse behaviors were evaluated by nonlinear static and incremental dynamic analyses(IDA). It was observed that the flat plate wall structure was designed with smaller amount of reinforced concrete, and showed slightly larger displacement response compared with those of the wall slab structure. The collapse margin ratios of the two structures obtained from the incremental dynamic analyses satisfied the limit states specified in the ATC-63, and the structures turned out to have enough capacity to resist the design level seismic load.

Keywords : flat column dry wall system, inelastic behavior, ATC-63, seismic performance factor, effective beam width

1. 서 론

정부는 2004년부터 무분별한 재건축을 억제하고 주택의 장수명화와 수요자 가족 생애 주기(Life Cycle)에 맞추어 내부 구조를 자유롭게 변화시킬 수 있는 가변형 주택을 장려하는 방향으로 정책을 전환하였다. 또한 하중기준 개정에 따른 내진설계기준 강화(2005.04), 바닥충격음 규제(2005.07), 주택성능등급제 시행(2006.01) 및 2005년 12월부터 발코니 확장이 허용됨에 따라 아파트 형식도 기준에 사용되던 벽

식 구조에서 리모델링이 용이한 가변형 주택으로 전환하는 추세이다(건설교통부, 2005; 2006). 국내 공동주택의 대부분을 차지하는 벽식 구조시스템은 복잡하고 다양한 내력벽의 배치로 인하여 가변성 확보가 타 구조시스템보다 어렵다.

한국토지주택공사(LH공사)에서는 구조적 안정성, 가변성, 사업성이 확보된 격간벽 구조시스템(Staggered Wall-Beam System), 무량건식벽 구조시스템(Flat Dry Wall, FDW), 무량복합 구조시스템(Flat Column Dry Wall System, FcDW) 등을 제안하였다. 그 중 무량복합 구조시스템은 측벽

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수
Tel: 031-290-7563 ; Fax: 031-290-7570
E-mail: jkim12@skku.edu

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

및 세대간벽을 제외한 모든 벽을 경량건식벽체로 대체하여 장경간한 것으로, 입주자의 취향에 따라 자유로운 공간 계획이 가능하며, 향후 리모델링이 용이하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 벽식 구조시스템과 무량복합 구조가 혼합된 무량복합 구조시스템과 기존에 많이 이용되던 벽식 구조시스템의 내진성능을 파악하기 위하여 12층의 무량복합 구조시스템과 벽식 구조시스템을 설계하고, ATC-63(ATC, 2005)에서 제시하는 내진성능평가 방법론을 이용하여 각 구조 시스템의 내진성능계수의 적절성을 평가하였다. 벽식 구조시스템의 경우 KBC-2009(대한건축학회, 2009)에 반응수정계수가 제시되어 있으나, 무량복합 구조시스템의 경우 내진성능계수의 명확한 근거가 없다. 따라서 본 연구에서는 두 예제 구조시스템의 비선형 정적해석 결과를 바탕으로 ATC-63에서 제시하는 방법에 따라 내진성능계수를 산정하고, 그 값의 타당성을 평가하였다.

2. 무량복합 구조시스템

무량복합 구조시스템은 벽식 구조시스템에 기둥요소를 도입하여 구조시스템을 단순화시키고, 하중을 슬래브에서 기둥으로 직접 전달하는 구조시스템이다. 무량복합 구조시스템의 경우 기존의 벽식 구조시스템에 비하여 중대형 평면 적용 및 리모델링이 용이하며, 경간이 길어짐에 따라 요구되는 슬래브의 두께가 증가하여 층간소음 기준강화에 따른 공사비 상승을 최소화할 수 있다. 또한 골조형식의 단순화에 따른 공사기간 단축 및 시공성이 향상되어 공사비를 절감할 수 있는 장점이 있다.

이러한 장점에 따라, 시공이 간편하고 공사비가 비교적 저렴한 벽식구조 시스템의 장점에도 불구하고 다양한 평면과 가변성을 요구하는 소비자들의 욕구에 적절히 대응할 수 있는 가변형 공동주택의 일환으로, 무량복합 구조시스템의 적용 가능성에 관하여 연구가 진행되었다(이도범 등, 2005; 송영 등, 2008). 그러나 실내에 내력벽 및 기둥의 수가 적어짐에 따라 슬래브의 두께가 증가하게 되고, 중·대형 평면에 적용할 경우 슬래브의 처짐이 증가하고 바닥 충격음 및 층간

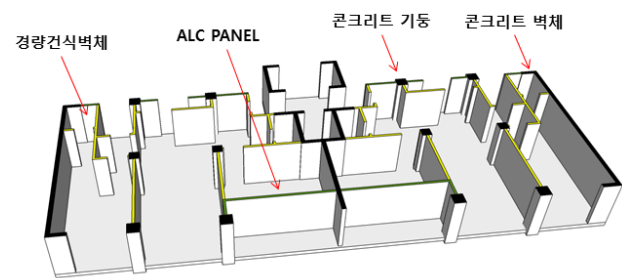


그림 1 무량복합 구조시스템의 개념도

소음에 대한 해결이 어려워질 수 있다.

3. 해석모델의 설계

벽식 구조시스템 및 무량복합 구조시스템의 내진성능을 비교하기 위하여 1개 층에 두 가구가 거주하는 평면 형태를 벽식 구조시스템과 무량복합 구조시스템에 동일하게 적용한 12층 예제 구조물을 MIDAS Gen Ver.785로 설계하였다.

3.1 예제 구조물의 설계

설계하중은 KBC-2009를 바탕으로 산정하였으며, 고정하중은 7kN/m^2 , 활하중은 숙박시설 객실에 해당하는 2kN/m^2 을 적용하였다. 지진하중과 풍하중을 산정하기 위한 계수는 표 1과 표 2에 나타내었다.

벽식 구조시스템의 경우 KBC-2009에서 제시하는 내진설계기준에 지진력 저항시스템으로 분류되어 있으나, 무량복합 구조시스템의 경우 내진설계기준에 지진력 저항시스템으로 분류되어 있지 않으므로 건물골조 시스템의 철근 콘크리트 전단벽에 해당하는 반응수정계수 5.0을 적용하여 설계하였다(이병구 등, 2006). 콘크리트의 설계강도는 27MPa , 철근은 SD400을 사용하였으며, 설계된 해석모델의 콘크리트 물량은 벽식구조의 경우 $20,766\text{kN}$, 무량복합 구조의 경우 $12,885\text{kN}$ 으로 나타나, 동일한 조건으로 설계된 경우 무량복합구조 모델이 38% 정도의 물량감소 효과가 있는 것으로

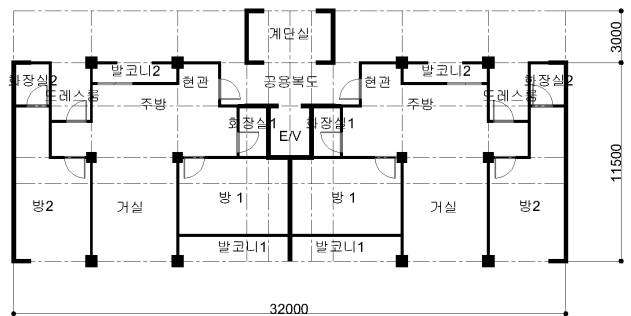


그림 2 무량복합 구조시스템의 평면도

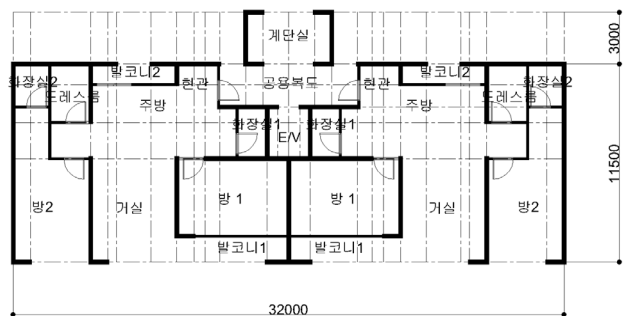


그림 3 벽식 구조시스템의 평면도

표 1 KBC-2009에 따른 지진하중 변수

지역계수(S)	0.22
지반종류	Sc
F _a	1.18
F _v	1.58
S _{DS}	0.43g
S _{D1}	0.23g
중요도계수(I _E)	1.2
반응수정계수(R)	5
내진설계범주	D

표 2 KBC-2009에 따른 풍하중 변수

노풍도	B
설계기본풍속	30m/sec
중요도계수	1.0
가스트계수	2.2

나타났다.

다양한 평면 및 층수에 대하여 지진응답을 예측하는 가장 정확한 방법은 비선형 해석법이지만, 현재 RC구조물의 비선형 거동 예측에 사용할 수 있는 해석 프로그램은 매우 제한적이다. 본 연구에서는 사용자가 비선형 이력거동 정의 및 입력이 가능한 비선형 해석프로그램인 Perform3D Ver.4를 사용하여 지진하중에 대한 비선형 해석을 수행하였다.

3.2 무량관 구조시스템의 슬래브 모델링

횡하중에 대한 무량관 구조시스템의 슬래브 휨강성을 평가하고 적용하기 위한 방법은 유한요소해석 모델(Plate bending finite model), 유효보폭 모델(Effective beam width model), 등가골조 모델(Equivalent frame model) 등이 있으며, 본 연구에서는 등가의 유효폭을 갖는 보요소로 치환하여 해석하는 유효보폭법을 적용하였다. 본 연구에서는 식 (1)의 Grossman의 유효보폭법(Grossman 등, 1997)을 적용하여 유효보폭을 구하였다.

내부기둥 (1a)

$$l_2' = \alpha \cdot l_2 = K_d \cdot \left[0.3l_1 + C_1 \frac{l_2}{l_1} + \frac{C_2 - C_1}{2} \right] \cdot \left(\frac{d}{0.9h} \right) \cdot (K_{FP})$$

단, $(0.2)(K_d)(K_{FP}) \cdot l_2 \leq (\alpha \cdot l_2) \leq (0.5)(K_d)(K_{FP}) \cdot l_2$

외부기둥 (1b)

$$l_2' = \alpha \cdot l_2 = K_d \cdot \left[0.3l_1 + C_1 \frac{l_2}{l_1} + \frac{C_2 - C_1}{2} \right] \cdot \left(\frac{d}{0.9h} \right) \cdot (K_{FP}) \cdot \left[l_3 + \frac{l_2}{2} \right]$$

표 3 Grossman 유효보폭법의 각 계수

횡변위비	K _d	접합부 위치	K _{FP}
1/800	1.1	내부 기둥	1.0
1/400	1.0	외부 기둥	0.8
1/200	0.8	단부 기둥	0.8
1/100	0.5	코너 기둥	0.6

여기서,

C₁ : 횡하중에 평행한 방향의 기둥크기

C₂ : 횡하중에 수직인 방향의 기둥크기

l₁ : 횡하중에 평행한 방향의 스패ん길이

l₂ : 횡하중에 수직인 방향의 스패ん길이

l₃ : 외부기둥 중심과 슬래브 모서리까지의 길이

h : 슬래브의 두께

d : 슬래브의 유효깊이

K_d : 층간변위 영향 반영 계수

K_{FP} : 기둥 위치에 따른 계수

ACI-318-05(ACI-318-05, 2005)에서는 슬래브의 강성을 균열의 영향을 고려하여 25%에서 50% 저감시키는 것이 적절하다고 제안하고 있다. 따라서 본 예제 구조물에서는 슬

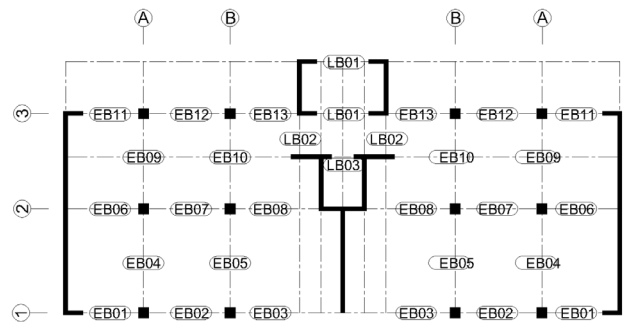


그림 4 무량복합 구조시스템의 구조평면도

표 4 유효보 산정 결과

	기둥 위치	유효보 폭(cm)
EB01	외부	100
EB02	외부	100
EB03	외부	120
EB04	내부	130
EB05	내부	140
EB06	내부	130
EB07	내부	130
EB08	내부	140
EB09	내부	130
EB10	내부	140
EB11	외부	90
EB12	외부	90
EB13	외부	100

래브 강성을 25% 저감하여 해석하였다.

설계된 유효보를 적용한 무량복합 구조시스템의 구조평면도를 그림 4에 나타내었다. 표 4는 식 (1)을 적용하여 산정한 유효보의 폭을 나타내며, 유효보의 두께는 21cm이다. 슬래브 EB01-EB13의 위치는 그림 4에 나타나있다.

4. ATC-63에 의한 내진성능평가

4.1 내진성능 평가 절차

ATC-63에서는 현재 내진기준에 제시되어 있지 않은 구조 시스템이나 새롭게 개발된 구조부재를 횡하중 저항시스템에 사용할 경우, 구조물의 내진성능계수를 결정할 수 있는 합리적인 방법론을 제시하고 있다. 따라서 ATC-63은 기존에 있는 구조시스템 또는 새롭게 제안된 구조시스템에 대하여 현행 내진설계기준에서 제시하는 계수와 동일한 안전율을 확보할 수 있는 내진성능계수를 합리적으로 결정함에 그 목적이 있다.

ATC-63은 NEHRP Recommended Provisions과 ASCE/SEI 7-05와 같은 내진성능 계수를 사용하며, 500년 재현주기 지진에 대한 인명안전(Life Safety) 성능 목표를 기준으로 한다. 이는 약 2500년 재현주기 지진(Maximum Considered

Earthquake(MCE) Ground Motion)에 대해 지진력 저항 시스템이 낮은 붕괴 확률을 갖도록 함으로써 인명안전의 성능 목표에 도달하도록 하는 것이다. ATC-63에서 사용되는 내진성능계수는 구조시스템의 Pushover 곡선으로부터 정의할 수 있는 반응수정계수(R), 변위증폭계수(C_d)와 초과강도계수(Ω) 등이며 이것은 그림 5에 나타내었다.

그림 (6)은 구조시스템의 비선형 거동과 MCE(Maximum Considered Earthquake)수준의 지진하중과의 관계를 명확하게 보이기 위하여 Pushover 형태의 그림을 5% 고유 감쇠비를 가정한 스펙트럼 좌표계로 치환한 그래프이다. 그래프 상의 1.5라는 계수는 DBE(Design Base Earthquake)에 대한 MCE 수준의 스펙트럼 가속도의 비로부터 유추된 값이며, ATC-63은 MCE 수준의 지진에 대하여 안전율을 평가하는 방식으로 구조시스템의 내진성능 계수를 산정한다.

MCE 수준의 지진에 대한 안전율은 붕괴여유비 CMR(Collapse Margin Ratio)에 의해서 평가되며, 식 (2)와 같이 구조물이 붕괴했을 때의 스펙트럼 가속도 \widehat{S}_{CT} 와 MCE 수준에서의 스펙트럼 가속도 S_{MT} 의 비로 정의된다.

$$CMR = \frac{\widehat{S}_{CT}}{S_{MT}} = \frac{SD_{CT}}{SD_{MT}} \tag{2}$$

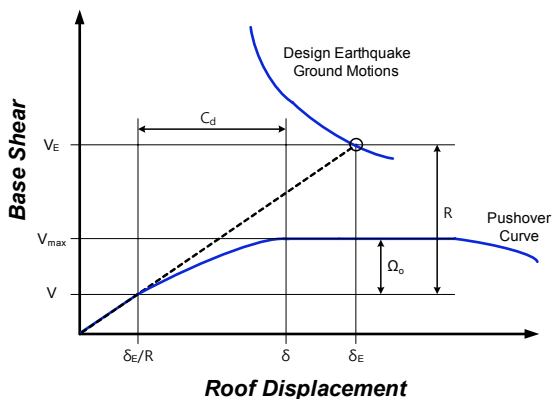


그림 5 Pushover곡선을 이용한 내진성능계수의 정의

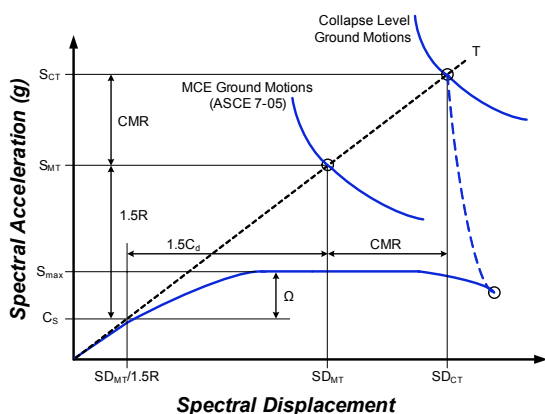


그림 6 ATC-63의 내진성능계수와 CMR

4.2 지진기록의 선정과 스케일링

비선형 시간이력 해석을 통하여 구조시스템의 CMR을 평가하여 시스템 붕괴에 대한 안전율을 결정하기 위하여 PEER NGA Database(PEER, 2006)를 통한 22쌍의 Far-Field 지진 데이터 군을 사용하였다.

각 지진 기록별로 규모 및 진원지와의 거리, 지반조건 등이 다르며, 이러한 불확실성을 제거하기 위하여 22쌍의 지진 데이터는 정규화 과정을 거치게 된다. 정규화된 22쌍의 지진 기록의 대푯값(Representative Value)을 정의하고 이 대푯값을 지반조건에 따른 MCE 스펙트럼에 anchoring시킨다.

4.3 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 다음 식 (3)의 중력하중을 선 재하한 뒤, 횡하중을 가력하고 ASCE/SEI 41-06(2007)의 절차에 따라 비선형 정적해석을 수행한다.

$$1.05(DeadLoad) + 0.25(LiveLoad) \tag{3}$$

그림 (7)은 이상화된 비선형 정적해석의 곡선이며, 초과강

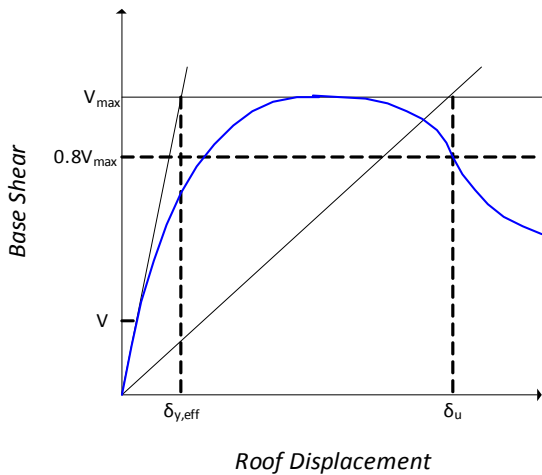


그림 7 이상화된 Pushover Curve

도 계수와 주기기반 연성도를 산정하는 식은 식 (4) 및 식 (5)과 같다.

$$\Omega = \frac{V_{max}}{V} \tag{4}$$

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \tag{5}$$

여기서,

δ_u : 구조물의 최대 밀면전단력 80%지점의 변위

$\delta_{y,eff}$: 유효 항복변위

또한 유효항복변위를 산정하기 위하여 식 (6)을 이용한다.

$$\delta_{y,eff} = C_0 \frac{V_{max}}{W} \left[\frac{g}{4\pi^2} \right] (\max(T, T_1))^2 \tag{6}$$

여기서,

T : 주기산정식에 의한 주기

T_1 : 고유치 해석에 의한 주기

항복변위를 산정하기 위한 과정에서 등가 단자유도 시스템의 스펙트럼 변위를 구조물의 최상층 변위로 변환하기 위한 계수 C_0 를 식 (7)을 이용하여 산정한다.

$$C_0 = \phi_{1,r} \frac{\sum_1^N m_x \phi_{1,x}}{\sum_1^N m_x \phi_{1,x}^2} \tag{7}$$

여기서,

m_x : x 층에서의 질량

$\phi_{1,r}(\phi_{1,x})$: x 층(지붕층)에서 1차모드 좌표

4.4 비선형 동적해석

중분 동적해석(Incremental Dynamic Analysis, IDA)은 구조물이 붕괴에 이를 때 까지 정규화된 지반거동의 크기를 점진적으로 증가시키며 비선형 시간이력해석을 수행하는 방법이다(Vamvatsikos 등, 2005). IDA를 통하여 구조물의 50% 붕괴확률(\widehat{S}_{CT})을 산출할 수 있다.

구조물의 붕괴 여유비는 해석에 사용된 지진기록의 진동수 성분(Spectral Shape)에 영향을 받으며, 이러한 영향을 보정하기 위하여 스펙트럼 형상계수(SSF, Spectral Shape Factor)를 이용한다. SSF는 지진파의 스펙트럼 형상의 다양성과 구조물이 보유한 연성능력, 주기에 따른 응답특성을 반영하기 위한 계수이며, 구조물의 주기 및 연성능력에 따라 ATC-63에 주어져 있다. 응답특성 반영 계수인 SSF를 이용하여 ACMR(Adjusted Collapse Margin Ratio)을 식 (8)와 같이 구할 수 있다.

$$ACMR = SSF \times CMR \tag{8}$$

ACMR을 평가하기 위하여 기준의 완성도, 실험데이터의 질적 수준, 지반진동이력의 다양성, 비선형 모델에 내포된 불확실성을 보정하기 위한 지표인 β_{TOT} (Total System Uncertainty)를 다음과 같이 계산한다.

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \tag{9}$$

여기서,

β_{RTR} : 각 지진에 대한 구조물 응답 다양성 반영

β_{DR} : 설계기준의 완성도 반영

β_{TD} : 실험 데이터의 질 반영

β_{MDL} : Modeling 한계 반영

성능평가의 경우 β_{RTR} 는 0.4를 사용하며 β_{DR} , β_{TD} 및 β_{MDL} 은 (A) Superior에서 (D) Poor까지 0.2부터 0.65의 값을 가진다(ATC, 2005). 식 (9)와 같이 계산된 β_{TOT} 에 해당하는 붕괴확률을 구하고, 붕괴확률에 따라 앞서 가정한 반응수정계수 R값에 대한 적합성을 판단하여 ACMR을 평가한다.

표 5는 β_{TOT} 와 허용 붕괴확률(Values of acceptable collapse probability) 10%와 20%에 대한 허용기준

표 5 β_{TOR} 에 따른 기준 ACMR

Total System Collapse Uncertainty	Collapse Probability				
	5%	10% (ACMR _{10%})	15%	20% (ACMR _{20%})	25%
0.600	2.68	2.16	1.86	1.66	1.50
0.625	2.80	2.23	1.91	1.69	1.52
0.650	2.91	2.91	2.30	1.96	1.73
0.675	3.04	2.38	2.01	1.76	1.58
0.700	3.16	2.45	2.07	1.80	1.60
0.725	3.30	2.53	2.12	1.84	1.63
0.750	3.43	2.61	2.18	1.88	1.66
0.775	3.58	2.70	2.23	1.92	1.69
0.800	3.73	2.79	2.29	1.96	1.72
0.825	3.88	2.88	2.35	2.00	1.74
0.850	4.05	2.97	2.41	2.04	1.77
0.875	4.22	3.07	2.48	2.09	1.80
0.900	4.39	3.17	2.54	2.13	1.83
0.925	4.58	3.27	2.61	2.18	1.87
0.950	4.77	3.38	2.68	2.22	1.90

ACMR_{10%}와 ACMR_{20%}(Acceptable values of ACMR)의 값이며, 5%, 15%, 25%의 허용 붕괴확률은 비교와 참고를 위한 값으로 제공된다. 따라서 β_{TOR} 에 따라 붕괴확률이 10%와 20%일 때의 기준 ACMR_{10%}과 ACMR_{20%}을 결정할 수 있고, ATC-63에서는 성능 그룹별로 계산된 ACMR의 평균값이 ACMR_{10%}이상이어야 하며, 성능 그룹의 각 개별 대상구조물의 ACMR은 ACMR_{20%}이상이어야 하는 것으로 규정하고 있다.

5. 무량복합과 벽식 구조시스템의 내진성능평가

무량복합 구조시스템 및 벽식 구조시스템의 거동양상을 분석하기 위해 비선형 해석 프로그램인 Perform3D Ver.4를 이용하여 y(단변)방향 1차모드 형상에 비례하여 각 층의 횡하중을 산정하고 점진적으로 증가하며 비선형 정적해석을 수행하였다.

해석에 사용된 기둥 및 보의 비선형 이력모델은 ASCE/SEI 41-06에 제시되어 있는 Cord-Rotation 방식에 따라 정의하였고, 재료의 초과강도를 고려하여 콘크리트의 압축강도는 1.5배, 철근의 항복강도는 1.25배를 적용하였다. 콘크리트의 인장강도는 무시하였다. 그림 8은 기둥요소에서 요구되는 힌지의 모멘트-회전관계를 보여준다.

벽체는 내진상세가 적용되지 않았으므로 콘크리트의 구속 효과는 적용하지 않았고, "Shear Wall"요소를 사용하여 비선형 해석을 수행하였다. 콘크리트 재료의 응력-변형률 관계는 Paulay and Priestley(1992)에 따라 정의하였다. 콘크

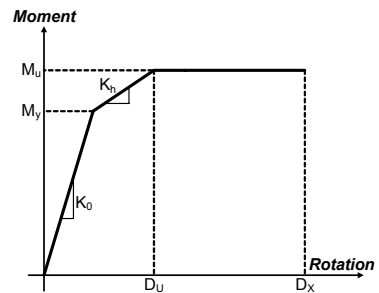


그림 8 기둥의 Moment-Rotation 관계

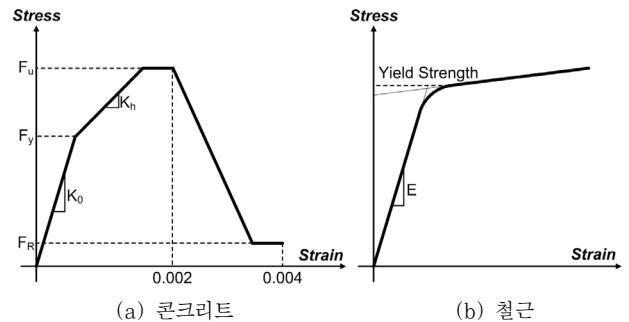


그림 9 벽체의 재료 비선형 모델

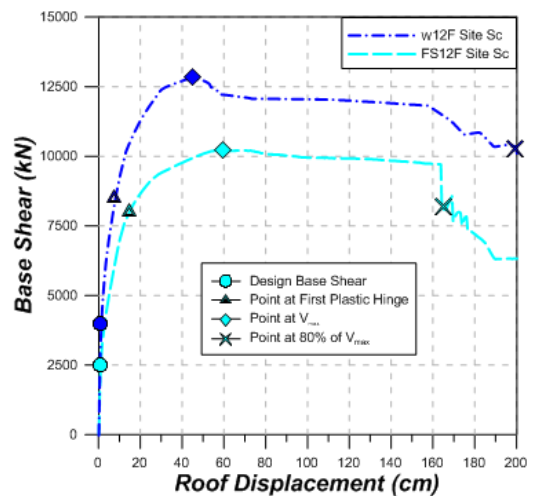


그림 10 각 구조물의 비선형 정적해석 결과

리트의 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).

비선형 정적해석 결과를 바탕으로 무량복합 구조시스템(FS 12F) 및 벽식 구조시스템(W 12F)의 비선형 정적해석에 의한 하중-변위 곡선을 그림 10에 나타내었다.

비선형 정적해석 결과 얻어진 pushover 곡선에 설계밀면 전단력과 전단력의 최대지점 및 강도가 최대전단력이 80%로 감소하는 지점을 표기하였다. 벽식 구조시스템의 경우 최하

단부 외곽벽체와 중앙 코어 반대편 벽체에서 소성힌지가 발생하여 상부로 전이되며, 무량복합 구조시스템에 비해 상대적으로 높은 강성 및 최대강도를 보였다. 또한 무량복합 구조시스템의 경우 최하부 코어 반대편 기둥에서 소성힌지가 발생하여 상부로 전이되는 거동 양상을 보였다.

IDA 결과를 이용하여 \widehat{S}_{CT} 를 산정하고 구조물의 한계 손상기준을 정의하기 위하여 비선형 정적해석 결과 하중-변위 곡선의 최대 내력이 80%로 감소하는 지점의 층간변위비를 이용하였다. 또한 IDA해석 시, 44개의 지진하중 군 중, 22개의 지진하중이 구조물의 한계상태 즉, 최대 내력이 80%로 감소하는 지점에 도달한 시점을 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 각 점들은 지진하중을 0.1g씩 증가시킨 단계를 의미하며, 회색 점은 해당 구조물의 한계상태를 유발시키지 않은 22개의 지진이며, 적색 점은 해당 구조물의 한계상태를 유발시키는 22개의 지진을 나타낸다. 해석결과를 바탕으로 층간

표 6 예제 구조물 주기별 스케일링

	무량복합 구조물	벽식 구조물
주기(sec)	0.53	0.43
MCE	0.66	0.66
Median	0.71	0.73
Anchoring Factor	0.93	0.90

표 7 내진성능계수 평가결과

해석모델	붕괴여유비			허용값	
	CMR	SSF	ACMR	ACMR _{20%}	P/F
무량복합	10.1	1.14	11.5	1.84	Pass
벽식	12.9	1.14	14.7	1.84	Pass

변위비가 무량복합 구조시스템은 0.04, 벽식 구조시스템은 0.05에 도달할 때를 한계상태로 정의하였다. 비선형 동적해석을 위해 감쇠비는 모든 모드에 대해 5%로 가정하였고, 편칭효과는 고려하지 않았다. 각 구조시스템별 고유주기에 따른 스케일링의 결과는 표 6에 나타내었다.

구조시스템에 대한 비선형 동적해석을 통해 산정된 22번째의 한계상태를 유발하는 가속도 값인 \widehat{S}_{CT} 와 MCE수준의 가속도 값의 비를 이용하여 CMR값을 산정하고 예제 구조물의 내진성능을 평가하였다. 본 연구에 사용된 두 가지의 구조시스템 중 무량복합 구조시스템의 경우 CMR값이 10.1로 산정되었으며, 벽식 구조시스템의 경우 CMR값이 12.9로 산정되어 벽식구조가 붕괴에 대하여 좀 더 큰 여유비를 갖는 것으로 나타났다.

β_{TOR} 를 산정하기 위해 원형모델의 등급은 (C) Fair, 실험 데이터 등급은 (C) Fair, 설계요구조건 등급은 (C) Fair를 적용하여 ATC 63 Table 7-2a~d에 따라 β_{TOR} 는 0.725로 산정하였다. SSF는 ATC 63 Table 7-1a를 이용하여 식 (5)에 의한 μ_T 와 β_{TOR} 를 적용하여 결정하였다. 식 (8)에 의해 계산된 무량복합과 벽식 구조시스템의 ACMR은 각각 11.5 및 14.7로 나타나, 허용값인 ACMR_{20%} 1.84을 크게 초과하는 것으로 나타났다(표 7). 따라서 해석모델의 설계지진하중 산정에 사용된 반응수정계수는 매우 안전측 값을 알 수 있고, 두 구조물 모두 설계 지진하중에 대하여 상당한 저항능력을 보유하고 있음을 알 수 있다. 또한 본 예제 구조물이 일반적인 공동주택의 평면 구성을 참고한 것을 감안할 때, 현존하는 공동주택 구조물들은 상당한 내진성능을 가진 것으로 사료된다. 두 구조 시스템을 동일한 조건하에서 설계하였을 때 벽식 구조시스템 모델에 비하여 무량복합 구조시스템이 약 40% 적은 콘크리트 물량으로 설계되었으나, 해석결과를 통하여 붕괴여유비는 약 20% 작은 것으로 나타나 내진성능의 감소에 비하여 더욱 큰 물량감소 효과가 있는 것으로 나타났다.

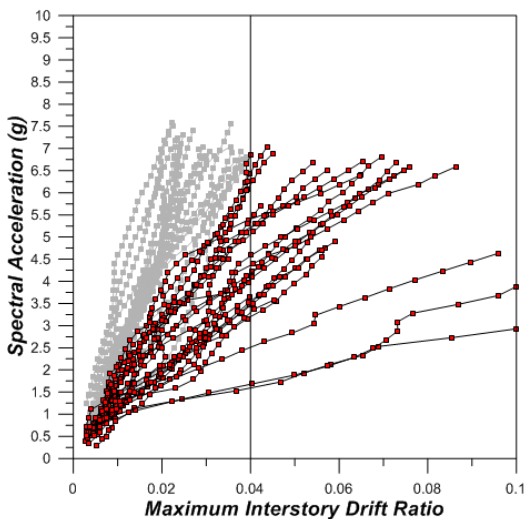


그림 11 무량복합 구조시스템의 IDA해석 결과

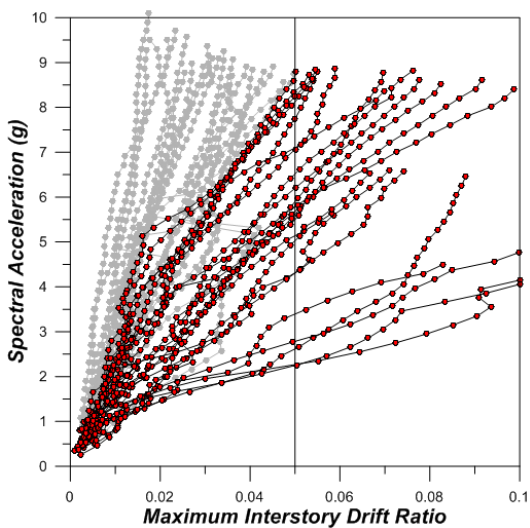


그림 12 벽식 구조시스템의 IDA해석 결과

6. 결 론

본 연구에서는 ATC-63에서 제안하는 절차에 따라 무량복합 구조시스템과 벽식 구조시스템의 내진성능을 비교 및 평가하였다.

두 구조시스템 모두 외벽 및 세대 간 전단벽이 설치된 단변방향으로 비선형 정적해석과 IDA해석을 수행하였으며, 동일한 설계하중에 대하여 무량복합 구조시스템이 동일한 규모의 벽식 구조시스템 보다 약 40% 적은 물량감소 효과를 보여 무량복합 구조시스템이 벽식 구조시스템보다 상대적인 경제적 장점이 있음으로 나타났다.

비선형 정적해석 결과에 따르면 벽식 구조시스템이 무량복합 구조시스템 보다 높은 강성과 최대강도를 가지는 것으로 나타났다. 또한 IDA 결과, 벽식 구조시스템이 무량복합 구조시스템보다 구조물의 한계상태를 유발하는 층간변위비가 크게 나타났다. 이는 Y축 방향에 평행하게 배치된 벽체들이 지진하중에 매우 효과적인 저항을 하는 것으로 판단된다. 두 예제 구조시스템 모두 ATC-63에서 제시하는 내진성능 기준을 큰 여유도를 가지고 충족하는 것으로 나타났으며, 무량복합 구조시스템이 벽식 구조시스템에 비하여 충분한 물량감소 및 가변성의 향상 효과가 있으므로, 실무 적용에 있어 장점을 가지고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단(No. 2011-0015734)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2005) 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준.
 건설교통부 (2006) 주택성능 등급 표시제.
 송영, 최경륜 (2008) 주거용 무량복합구조(FcDW)시스템 설계와 적용, 한국콘크리트학회지 20(2), pp.37~42.
 신우승, 김진구 (2008) 강관과 가새로 보강된 무량관 구조물의 내진성능평가, 한국전산구조공학회 논문집 21(5), pp.451~458.
 이도범, 김옥중, 이지웅 (2005) 무량관 아파트 구조시스템 해

석, 대림기술정보 번호, pp.46~57.
 이병구 (2006) 중저층 공동주택 구조시스템 연구, 쌍용건설기술 번호, pp.20~27.
 ACI (2005) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318M-05), American Concrete Institute.
 ASCE (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, American Society of Civil Engineers, Reston Virginia.
 ASCE (2007) Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE Standard ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, Reston Virginia.
 ATC (2005) Quantification of Building Seismic Performance Factors, ATC-63, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
 FEMA (2009) NEHRP Recommended Seismic Provisions, FEMA P-750, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., 2009.
 Jacob S. Grossman. (1997) Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slab in Slab-Column Frames, ACI Structural Journal Technical Paper.
 KBC (2009) 건축구조설계기준, 대한건축학회
 Paulay, T., Priestley, M.J.N. (1992) Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings.
 PEER (2006) Peer NGA Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, U.S.A., <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
 Vamvatsikos, D., Cornell, C.A. (2005) Seismic Performance Capacity and Reliability of Structures as seen through Incremental Dynamic Analysis, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Rep. No. 151, Dept of Civil and Environmental Eng. Stanford Univ., Palo Alto, CA.

- 논문접수일 2012년 3월 14일
- 논문심사일 2012년 3월 23일
- 게재확정일 2012년 5월 4일