

하부골조의 층수에 따른 주상복합건물의 적정 반응수정계수에 관한 연구

A Study on the Appropriate Response Modification Factor(R) for the Complex Building Based on the Number of Stories of Lower Frame-Upper Wall

최 문 성* 김 희 철**
Choi, Moon Soung Kim, Hee Cheul

국문요약

최근 국내에서 많이 건설되어지고 있는 주상복합 건축물은 하부의 골조형식과 상부의 벽식 구조가 결합된 구조형식을 가지고 있다. 따라서 지진 발생시 동일한 형식을 가진 건축물과는 상이하고 복잡한 반응을 보이게 된다. 이러한 건축물의 등가정적 해석시 국내 규준에서는 기타구조물로 분류하여 3.5의 반응수정계수를 적용하고 있다. 그러나 이 계수는 검증되어지지 않은 상태로 사용되어지고 있으므로 상당한 위험성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 단순화한 주상복합 건물의 해석 및 실제의 건물에 대한 3차원 비선형 해석을 통하여 반응수정계수를 유도하였다. 유도된 반응수정계수는 ATC 기준과 우리나라 기준의 차이를 고려한 보정을 수행하였다.

주요어 : 반응수정계수, 정적 비선형 해석, 주상복합건물

ABSTRACT

The complex building constructed in Korea has a unique structural system composed of upper wall and lower frame type. Therefore, quite different and complicate response will occur compared with that having common structural type under the seismic load. The coefficient of 3.5 has been used for the response modification factor, R, in performing equivalent static analysis of a structure. However, this may not be a correct coefficient since no verification has been made for the complex building of this type. An R factor was derived through the 3 dimensional push-over analysis of some simplified structures and actual structures. The derived R factor has been modified considering the code difference of an ATC and the current Korean building code.

Key words : response modification factor, push-over analysis, upper wall lower frame type structure

1. 서 론

우리 나라에서의 내진설계 규준은 1988년에 개정된 '건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'에서 건축물의 내진 설계 규정이 제정되면서 시작되었다. 우리나라의 내진규준은 지진에 대한 경험 부족으로 설계상의 철차뿐만 아니라, 규준

내의 설계계수 또한 대부분 외국의 규준(ATC3-06, UBC)을 준용하여 사용하고 있다. 따라서 외국 규준에 제시되지 않는 몇몇 구조형태에 대한 설계계수는 명확히 정립하지 않고 경험적으로 사용되고 있다.

반응수정계수는 이러한 설계계수 중 등가정적해석시 필수적으로 요구되는 계수중 하나이다. 반응수정계수를 사용하는 이유는 구조물의 비선형 거동을 고려한 경제적 설계 때문이며 이에 따른 필요 조건은 부재가 항복 후에도 초과

* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원 · 경희대학교 건축공학과 부교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시기
그 결과를 게재하겠습니다.

적인 저항 강도를 유지한다는 것이다. 내진 설계기준에서의 반응수정계수는 지진 발생 시 구조물의 에너지 흡수 능력을 나타내는 지표이며, 구조시스템 종류와 부재의 횡보강 정도에 따라 그 값이 다르다.

내진 설계 과정에서 사용한 R값이 적절하지 못하였을 때 건축물이 입게 될 막대한 지진 피해와 이에 따른 경제적, 사회적 손실을 감안한다면 내진 설계 기준에 사용되는 반응수정계수는 명확한 정립을 통하여 산정되고 사용되어야 할 것이다. 등가정적해석시 반응수정계수가 실제보다 크게 산정되면 지진이 발생했을 때 구조물에 막대한 피해가 우려되고, 작게 산정되면 과잉설계로 경제적 손실이 발생하게 된다.

하부골조 상부벽식 시스템을 가지는 주상복합 건축물에 관한 연구는 현재까지 국내에서 수행된 일이 거의 없는 실정이다. 따라서 대부분의 실무종사자들은 이를 기타 구조물로 분류하여 반응수정계수로 3.5를 적용하고 있다. 그러나, 주상복합 건축물은 상이한 두 구조 시스템의 교차 부위에서 응력집중현상에 의한 과도 전단이 발생하며 지진력에 대한 거동 또한 골조식이나 내력벽식과 같이 동일한 구조형식으로 된 구조물과는 상이하게 나타난다. 또한 지진하중에 대하여 수직방향 강성의 변화로 인하여 soft story현상이 발생할 수 있다. 따라서 밀면 전단력 산정시 반응수정계수를 아무런 검증없이 기타구조물로 분류하여 3.5를 사용한다는 것은 건물의 전체적인 안전성을 고려할 때 매우 위험한 현상이라고 할 수 있다.

2. 연구의 범위 및 방법

주상복합 건물의 반응수정계수를 결정하기 위해서는 건축물의 폭-높이 비, 하부 라멘조의 층수 및 높이, 상부 벽식구조의 층수 및 높이, 전단벽의 위치 및 전단벽의 단면적 등의 매개변수를 고려해야 한다. 그러나 본 연구에서는 이들 중 건축물의 하부 라멘조의 층수 및 높이, 상부 벽식구조의 층수 및 높이를 매개변수로

하였다.

주상복합 건축물의 가장 취약한 조건을 파악하기 위하여 가로 3경간, 세로 2경간의 단순화된 평면의 해석모델을 선정하여 하부 골조부분의 층수를 1~5개 층, 상부 벽식구조의 층수를 10, 12, 14, 18개 층으로 변화시키면서 11개의 모델에 대하여 전산해석을 수행하였다. 단순화된 전산해석 모델에 대한 해석 결과를 바탕으로 가장 취약한 조건을 파악하고 그 조건에 부합하는 실제 시공된 구조물에 대한 반응수정계수를 산정하였다.

범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/GEN을 이용하여 11가지의 단순화된 모델의 구조물을 설계하였다. 또한 기존의 건축물은 구조도면에 나타난 부재 치수를 그대로 적용하였다.

- 1) 반응수정계수에 대한 문헌의 검토 - 반응수정계수의 산정 시 필요한 요소들을 파악하고 그 산출 방법을 검토하였다.
- 2) 단순화된 구조물의 설계 - 매개변수에 따른 반응수정계수의 영향을 파악하기 위하여 단순화된 모델의 평면을 선정하고 MIDAS/GEN을 이용하여 부재 설계를 수행하였다.
- 3) 단순화된 구조물의 해석 - 층수를 달리한 단순화된 구조물에 대하여 push-over analysis를 수행하고 가장 취약한 형태를 파악하였다.
- 4) 실제 시공된 건축물에 대한 해석 - 기존에 시공된 건축물을 대상으로 3차원 push-over analysis를 수행하였다. 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다.
- 5) 우리나라 기준에 적합한 반응수정계수 보정 - ATC기준을 기초로 산정된 반응수정계수를 우리나라 기준에 맞도록 보정하였다.

3. 반응수정계수의 구성요소

반응수정계수에 대한 산정식이 ATC 3-06 (1978년)에서 처음으로 제시된 이후 많은 연구들이 수행되었다. 그 결과 최근에 식 (1)과 같이 반응수정계수 R을 4개의 구성요소로 표현하는

새로운 산정식이 제안되었다(ATC-19).

$$R = R_{\mu} \times R_S \times R_R \times R_{\xi} \quad (1)$$

여기서 R_{μ} =주기에 의존하는 연성계수

R_S =주기에 의존하는 강도계수

R_R =영여도계수

R_{ξ} =감쇠계수

3.1 강도계수(strength factor)

일반적으로 건축물의 최대 저항수평강도는 설계수평강도를 초과한다. 건축물에서 초과강도가 발생하는 원인은 다음과 같다.

- 건축물의 높이가 낮을 경우에는 횡하중에 의한 전단력보다 중력하중에 의한 축력에 의해 기둥부재의 설계가 이루어진다.
- 지진하중 작용 시 기둥부재의 변위가 기준에서 제시하는 최대 횡변위 보다 크지 않도록 설계한다.
- 지진 위험도가 낮은 곳에 위치한 건축물과 지진 위험도가 높은 곳에 위치한 건축물은 지진 하중에 대한 중력하중의 비율이 다르다.
- 건축물의 지진피해의 한계에 대한 설계자들의 결정이 초과강도에 기인한다.

건축물 또는 골조 시스템의 강성은 비선형 정적 해석(push-over analysis)을 수행하여 평가할 수 있으며 이는 다음과 같이 결정한다.

- ① 비선형 정적 해석을 수행하여, 건축물의 밀면전단력-지붕층 변위의 관계를 파악한다.
- ② 응답의 한계상태에서 지붕층 변위에 대응하는 건축물의 최대 밀면전단력 (V_{max})을 산정한다. 건축물의 초과강도는 설계 밀면전단력 (V_{design})과 최대 보유강도 사이의 차로 구해지며, 강도계수는 식 (2)에 의하여 산정한다.

$$R_S = \frac{V_{max}}{V_{design}} \quad (2)$$

그림 1은 구조물의 비선형거동을 개념적으로 나타낸 것으로 push-over analysis의 수행 결과를 바탕으로 설계 밀면 전단력과 최대 밀면 전단력을 산출하는 방법이다.

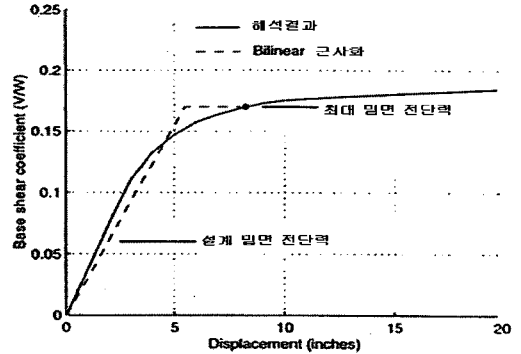


그림 1 강도계수 산정 전단력 정의

3.2 연성계수(ductility factor)

연성비는 항복변위에 대한 최대 변위의 비율을 말한다. 이에 대한 관계식은 현재 명확하게 정립되지 않았으나 ATC-19에서 몇몇 관계식을 제시하고 있다. 본 연구에서는 제시된 식들 중에서 다음 식을 사용하여 연성계수를 도출하였다.

Miranda와 Bertero(1994)는 압반, 충격도, 그리고 연약지반등 지반의 특성에 따라 $R_{\mu} - \mu - T$ 관계식을 다르게 제안하고 있다. 이들이 제안한 $R_{\mu} - \mu - T$ 의 관계식은 124개의 지진기록을 관측지점의 토질상태에 따라 위에 제시한 3가지의 지반조건으로 구분하여 각각 다르게 평가한 것이다. 여기에서의 감쇠상수는 임계감쇠상수의 5%로 모두 동일하게 적용하였다. 이 연구 결과에서 제안하고 있는 연성계수의 산정식은 식 (3)과 같다.

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \quad (3)$$

여기서,

$$\phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} e^{-1.5(\ln(T) - 0.6)^2} \quad (\text{압반})$$

$$\phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} e^{-2(\ln(T) - 0.2)^2}$$

(층적토)

$$\phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3 T_g}{4T} e^{-3(\ln(T/T_g) - 0.25)^2}$$

(연약지반)

T_g = 지반거동의 지배주기

ϕ = 변위 연성비

T = 고유주기

3.3 잉여도계수(redundancy factor)

잉여도계수는 건축물을 구성하는 일련의 수직방향 골조들이 분담하여 횡하중에 대한 저항을 고려한 계수이다. 내진 골조의 잉여도에 의한 영향을 정량적으로 조사한 연구는 극히 미비한 실정이며 ATC-34에서는 저항골조선의 수에 따라 표 1과 같이 구분하여 잉여도계수를 부여하고 있다.

표 1 잉여도계수

횡지진력에 대한 저항골조선의 수	2	3	4
잉여도계수	0.71	0.86	1.00

3.4 감쇠계수(damping factor)

감쇠는 일반적으로 건축물 골조의 이력거동과 점성감쇠에 의해 에너지를 소산시키는 능력을 나타낸다. 탄성영역 내에서 건축물의 이력거동에 의해 형성되는 감쇠특성은 일반적으로 등가점성감쇠로 표현되어지며, 임계감쇠의 5%를 사용하고 있다. 다음에 제시되어진 표 2는 UBC-94와 1989년 Wu와 Hanson에 의해 제시된 점성감쇠에 따른 감쇠계수를 나타낸 것이다.

표 2 감쇠계수

점성감쇠(%)	2	5	7	10	12	15	20
UBC94(R_μ)	0.80	1.00	-	1.20	-	-	1.50
Wu & Hanson(R_μ)	-	1.00	-	1.19	-	1.39	1.56

4. 해석 모델의 선정 및 해석

4.1 단순화된 모델의 선정

주상복합 건축물에서는 상부의 벽식구조와 하부의 골조구조를 연결하는 전이층(transfer floor)이 있다. 이 전이층에는 매우 큰 단면을 가지는 전이보(transfer girder)나 두꺼운 전이판(transfer slab)이 사용된다. 따라서 전이층의 질량과 강성은 인접한 층의 질량과 강성에 비하여 현저하게 차이가 난다.

주상복합 건축물의 반응수정계수 산정 시 고려할 수 있는 매개 변수로는 건축물의 폭·높이비, 하부 라멘조의 층수 및 높이, 상부 벽식구조의 층수 및 높이, 전단벽의 위치 및 단면적 등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 이들 매개변수 중 해석대상 건물의 하부골조 부분의 층수와 상부 벽식 부분의 층수만을 매개변수로 고려하였다.

단순화된 해석대상 건축물은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/GEN을 사용하여 응력해석을 수행하고 산출된 응력에 따라 설계를 수행하였다. 그리고 설계된 결과에 의하여 SAP2000을 이용한 push-over analysis를 수행하였다. 단순화된 각각의 모델에 대한 높이와 고유주기는 표 3과 같다. 그림 2와 그림 3은 단순화된 모델의 평면과 입면이다. 단순화된 모델들의 고유주기는 현행 기준상의 기타구조물에 적용하는

표 3 단순화된 모델의 높이 및 주기

층 수	높 이	고유 주기
하부1층 상부14층(1-14)	43.1m	0.8346
하부1층 상부16층(1-16)	48.7m	0.9431
하부1층 상부18층(1-18)	54.3m	1.0515
하부2층 상부14층(2-14)	47.0m	0.9102
하부3층 상부12층(3-12)	45.3m	0.8772
하부3층 상부14층(3-14)	50.9m	0.9857
하부3층 상부16층(3-16)	56.5m	1.0941
하부4층 상부14층(4-14)	54.8m	1.0612
하부5층 상부10층(5-10)	47.5m	0.9198
하부5층 상부12층(5-12)	53.1m	1.0283
하부5층 상부14층(5-14)	58.7m	1.1367

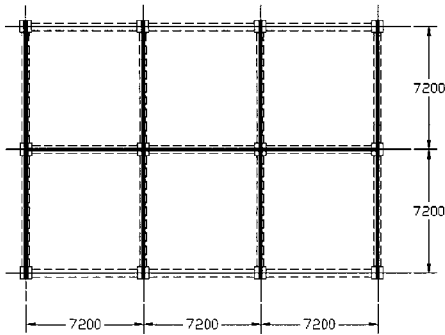


그림 2 단순화된 모델의 평면

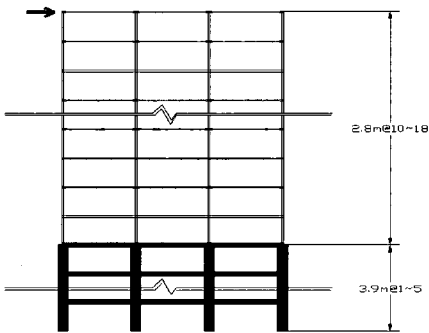


그림 3 단순화된 모델의 입면

고유주기 산정식을 사용하였다. 하부층의 설계 하중은 상가에 적용되는 하중을조건을 입력하였고, 상부 층은 아파트에 적용되는 하중을 사용하였다. 지진 하중은 MIDAS에서 제시되어진 ks.spectrum을 사용하였다. 사용부재는 28일 압축강도 240kg/cm^2 인 콘크리트와 4000kg/cm^2 인 철근을 사용하여 규준에 따라 설계하였다.

4.2 모델의 해석

건축물의 높이에 따른 영향을 파악하기 위하여 해석 모델을 하부골조 부분이 1층인 경우에는 상부의 벽 부분을 14층, 16층, 18층으로, 하부골조 부분이 3층인 경우에는 상부를 12층, 14층, 16층으로, 하부골조 부분이 5층인 경우에는 상부를 10층, 12층, 14층으로 나누었다. 또한 하부골조 부분의 층수에 따른 영향을 파악하기 위하여 하부가 2층과 4층 일 경우에는 상부의 벽 부분을 동일하게 모두 14층으로 두었다. 위에서

제시된 11가지의 모델에 대하여 최상층의 변위를 증가시켜가면서 push-over analysis를 수행하였으며 더 이상의 변위가 발생하지 않는 위치를 최대변위로 선정하였다. 그 결과 변위가 증가함에 따라 부재의 절점 부위에서 항복이 발생하고 비선형적인 거동을 나타내는 것을 알 수 있었다. 해석결과와 발생한 변위-밀면 전단력의 곡선은 그림 4~9와 같다.

4.3 해석결과 분석

해석에 의해 산출된 최상층 변위-밀면 전단력 곡선은 등가 에너지법을 이용하여 bilinear로 근사화 하였다. 근사화 시 항복점 이전의 기울기는 해석결과와 초기 기울기와 동일한 것으로 가정하였으며 항복점 이후는 응력 변화 없이 변위만 증가하는 것으로 간주하였다. 각 모델의 bilinear 그래프를 토대로 항복 변위를 도출하고

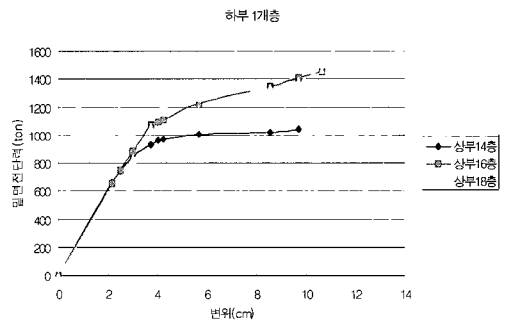


그림 4 1층의 하부골조를 가지는 건물 상부의 층수 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

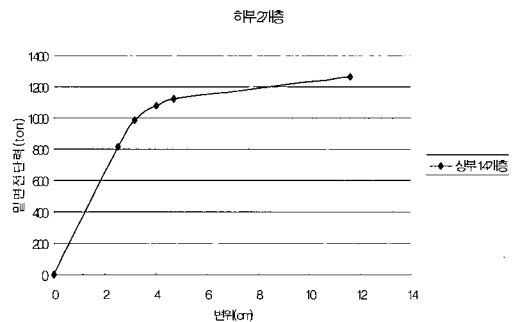


그림 5 2층의 하부골조를 가지는 건물 상부 층수의 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

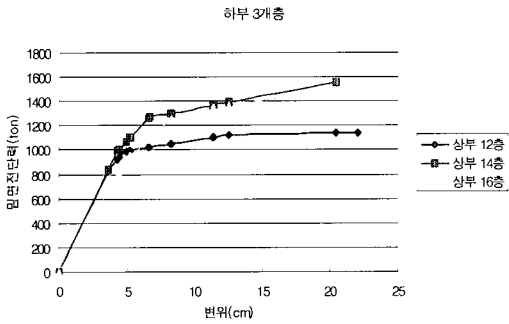


그림 6 3층의 하부골조를 가지는 건물 상부의 층수 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

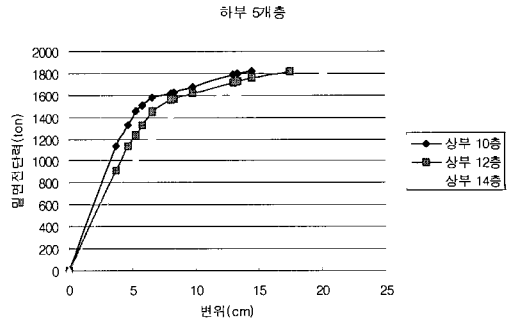


그림 8 5층의 하부골조를 가지는 건물 상부의 층수 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

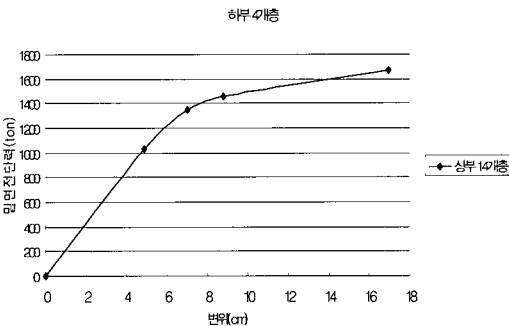


그림 7 4층의 하부골조를 가지는 건물 상부의 층수 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

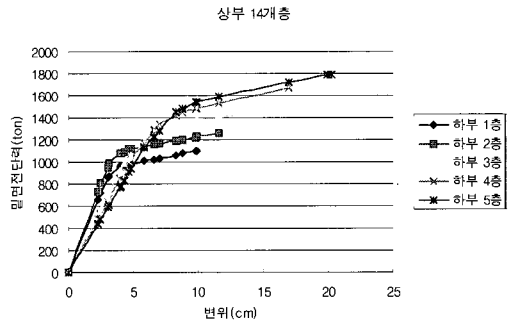


그림 9 14층의 상부벽을 가지는 건물 하부의 층수 변화에 따른 변위-밀면전단력 곡선

각각의 강도계수와 연성계수를 산출하였다. 단 최대 변형율은 최대 변위값을 한계 변위로 사용하였다.

그림 4 ~ 9에 나타난 것과 같이 단순화 모델의 해석결과를 고찰한 결과 건물의 연성능력은 상부 벽의 층수가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 건물의 높이가 동일할 경우 하부골조 부분의 층수가 감소함에 따라 연성능력이 감소하고 있다.

그림 4 ~ 8을 이용하여 강도계수와 연성비를 산출하였다. 산출된 연성비에 의한 연성계수는 여러 가지 지반의 특성을 감안하고 있는 장점이 있는 식 (3)을 이용하여 산출하였다. 또한 고유주기 T는 규준에서 기타구조물에 사용되는 산정식을 통하여 산출하였다.

표 4는 각 해석모델의 강도계수와 연성계수 그리고 이에 따른 반응수정계수를 나타낸 것이

다. 여기서 산출된 반응수정계수를 분석한 결과, 하부의 층수가 1개 층인 경우가 다른 경우들에 비하여 비교적 작은 값으로써 가장 불리한 것으로 나타났다.

5. 실제 건축물의 해석 및 결과

5.1 해석모델의 모델링

범용구조해석 프로그램인 SAP2000은 부재의 입력 시 부재의 단면적 뿐 아니라 철근 배근 또한 실제와 동일하게 입력할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 부재의 연성을 고려하기 위하여 그림 10과 같은 부재에 대한 응력-변위 그래프를 입력하도록 설정되어 있다. 주상복합 건물의 모델링에 있어서 주요한 점은 전단벽의 처리와 부재의 hinge 특성 부여이다.

표 4 단순화된 모델의 해석 결과

	설계 전단력	최대 밀면 전단력	강도 계수	항복 변위	최대 변위	연성도	연성 계수	반응수정 계수
1-14	692	1010	1.4595	4.0000	9.6906	2.4226	2.5496	3.7211
1-16	825	1290	1.5636	5.4091	10.6340	1.9659	2.1292	3.3292
1-18	891	1345	1.5095	5.8360	12.0339	2.0620	2.2988	3.4700
2-14	737	1180	1.6011	3.5417	11.5278	3.2549	3.5161	5.6296
3-12	692	1095	1.5824	4.7887	21.6901	4.5294	4.7047	7.4447
3-14	825	1400	1.6969	6.0563	19.8592	3.2791	3.6409	6.1782
3-16	891	1360	1.5264	7.4648	21.6901	2.9057	3.3254	5.0759
4-14	891	1525	1.7116	7.1528	16.8056	2.3495	2.6473	4.5311
5-10	692	1689	2.4408	5.5000	14.4286	2.6234	2.8496	6.9553
5-12	825	1650	2.0000	6.7143	17.4286	2.5957	2.9139	5.8278
5-14	891	1628	1.8272	8.4286	20.1429	2.3898	2.7359	4.9990

5.1.1 전단벽 모델링

FEMA273에서는 벽요소의 push-over analysis가 정확한 수치를 제공하지 못하므로 전단벽 요소를 등가의 기둥요소로 치환하는 해석 기법을 제시하고 있다. 전단벽 요소를 기둥요소로 치환할 경우 기둥부재는 전단벽과 등가인 휨 및 전단강성을 가져야 하며 기둥부재와 연결된 보요소는 전단벽과 동일한 강단이격 길이(ligid end offset)를 가져야 한다고 제시되어있다. 이를 그림으로 표현하면 그림 10과 같다.

5.1.2 보-기둥의 hinge특성 부여

부재의 항복하중과 항복변위는 해석 프로그램 내에서 부재의 면적과 배근에 따라 자

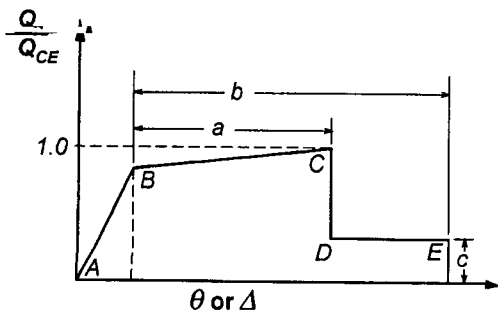


그림 10 응력-변위 그래프

동적으로 산출된다. SAP2000에는 보-기둥에 한 hinge 특성만을 부여할 수 있다. Hinge 특성은 축력과 모멘트에 의한 hinge 형성을 나타내는 입력코드(PMM)와 순수 전단에 의한 hinge 형성을 나타내는 입력코드(V2), 그리고 순수한 모멘트에 의한 hinge 형성을 나타내는 입력코드(M3) 등이 있다. 본 해석에서는 기둥부재인 경우 PMM과 V2를 다 고려하였으며 전이보의 경우에는 모멘트에 의한 휨 파괴보다 전단력에 의한 전단 파괴가 지배적이므로 V2를 사용하였다. 이들 hinge 특성은 그림 11에서 제시되어진 그래프에 의해 입력되어지며 표 5에 따른 수치들을 이용하였다.

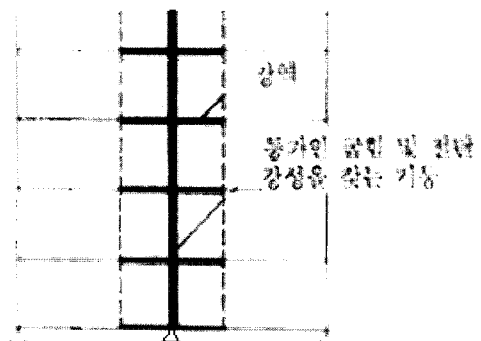


그림 11 전단벽 요소의 치환

표 5 철근콘크리트 부재의 비선형 해석을 위한 허용수치

			소성 변형각		잔여 강성비
			a	b	c
전단에 의해 지배되는 보					
늑근(stirup) 간격 $\leq d/2$			0.0	0.02	0.2
늑근(stirup) 간격 $> d/2$			0.0	0.01	0.2
전단벽					
$\frac{(A_s - A'_s) f_y + P}{t_w l_w f_c}$	$\frac{Shear}{t_w l_w \sqrt{f_c}}$	지점 고정			
≤ 0.1	≤ 3	○	0.015	0.020	0.75
≤ 0.1	≥ 6	○	0.010	0.015	0.40
≥ 0.25	≤ 3	○	0.009	0.012	0.60
≥ 0.25	≥ 6	○	0.005	0.010	0.30
≤ 0.1	≤ 3	×	0.008	0.015	0.60
≤ 0.1	≥ 6	×	0.006	0.010	0.30
≥ 0.25	≤ 3	×	0.003	0.005	0.25
≥ 0.25	≥ 6	×	0.002	0.004	0.20
힘에 의해 지배되는 기둥					
$\frac{P}{A_g f_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$				
≤ 0.1	≤ 3		0.02	0.03	0.2
≤ 0.1	≥ 6		0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	≤ 3		0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	≥ 6		0.01	0.015	0.2
전단에 의해 지배되는 기둥					
대근(hoop) 간격 $\leq d/2$ 또는 $\frac{P}{A_g f_c} \leq 0.1$			0.0	0.015	0.2
기타			0.0	0.0	0.0

A_s : 인장철근의 면적, A'_s : 압축철근의 면적, f_y : 인장철근의 항복강도, P : 축력, t_w : 벽두께
 l_w : 벽의 길이, f'_c : 콘크리트의 압축강도, A_g : 기둥의 전체면적

5.2 해석

3차원의 push-over analysis를 수행하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 해석 모델의 지반 경계 조건은 수직/수평/회전의 자유도를 완전고정으로 두었으며, 하부골조 부분의 하중증가에 따른 각 부재의 hinge 특성(M/M_y , θ/θ_y)을 부여하였다. 변위 제어는 최상층의 한 절점의 변위를 0cm에서부터 점차 증가시켜가며 해석을 수행하였다.

최하층에 위치한 전단벽은 등가의 기둥요소로 치환하여 입력하였다. 상부벽 부분은 하부 골조부분에 비하여 상대적으로 강성이 매우 크므로 본 연구에서는 하부 골조부분의 비선형성만 고려하고 상부 벽식부분의 비선형성은 고려하지 않았다. 따라서 상부벽식 부분은 변위만 나타나는 것으로 간주하였다. 실제 건축 모델의 push-over analysis 수행 결과 발생한 최상층변위-밀면전단력 곡선은 그림 12 ~ 15와 같다.

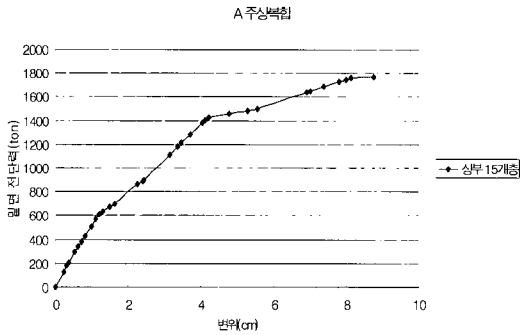


그림 12 A주상복합의 변위-밀면전단력 곡선

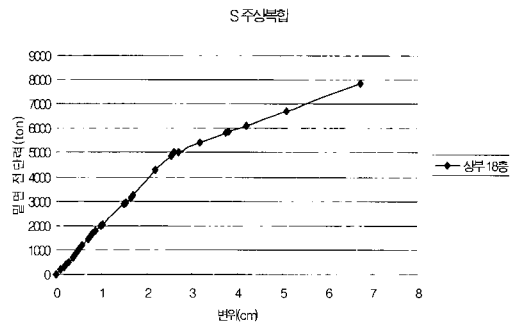


그림 14 S주상복합의 변위-밀면전단력 곡선

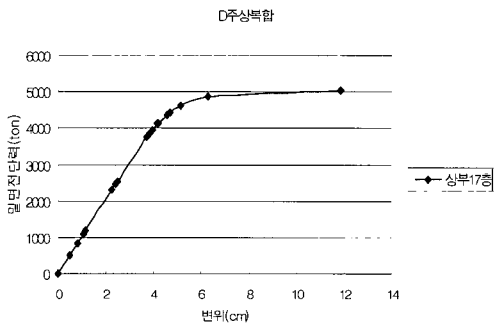


그림 13 D주상복합의 변위-밀면전단력 곡선

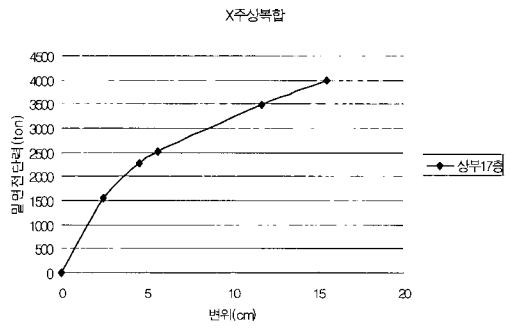


그림 15 X주상복합의 변위-밀면전단력 곡선

5.3 해석 모델의 거동

부재의 파괴는 횡력이 작용하는 방향의 반대편 외곽에 위치한 기둥의 하단부에서 시작되어 평면의 내부 기둥으로 진행되어 가는 형상을 보였다. 기둥 하단부의 파괴가 상단부보다 먼저 발생하는 것은 응력을 분산할 수 있는 부재가 없기 때문에 상단부보다 큰 모멘트가 발생하고 그에 따라 지점에서의 회전이 과다하게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 16은 소성 힌지가 발생하는 순서를 간단히 표현한 것이다.

5.4 해석결과 분석

해석결과의 분석 과정은 4.3에서 제시한 바와 동일하다. 표 6은 실제 건축물에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 해석 대상인 네

가지 건축물의 반응수정계수는 각각 3.61, 3.23, 3.39, 3.47로 나타났다. A주상복합 건축물의 반응수정계수가 다른 건축물의 반응수정계수에 비해 큰 값을 나타내었는데 이는 A 건물이 다른 건물에 비하여 상부 층수가 적기 때문으로 판단된다.

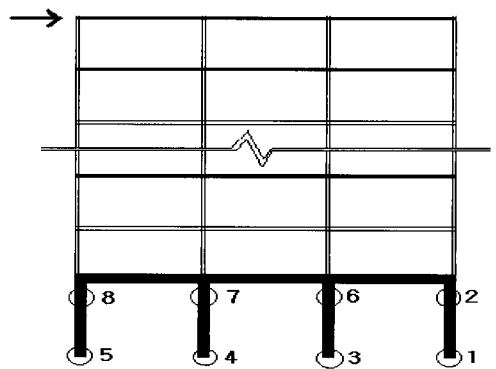


그림 16 기둥의 소성 힌지 형성순서

표 6 실제 건축물들의 해석 결과

	A 주상복합	D 주상복합	S 주상복합	X 주상복합
설계 전단력(ton)	1282	3521	4436	2942
최대 밀면 전단력(ton)	1432	4850	6700	3158
강도 계수	1.1170	1.3775	1.5104	1.0734
항복 변위(cm)	2.8030	4.8518	3.4387	4.8792
최대 변위(cm)	8.7121	11.8424	7.3518	15.4692
연성도	3.1081	2.4409	2.1380	3.1704
연성 계수	3.2324	2.4360	2.2449	3.2324
반응수정계수	3.6106	3.2315	3.3907	3.4697

6. ATC규준과 우리나라 규준의 차이에 따른 반응수정계수의 보정

ATC규준과 우리나라 규준의 밀면전단력 산정식은 차이가 있다. 따라서 이러한 산정식의 차이를 고려하여 우리나라 규준에 합당한 반응수정계수로 보정을 수행하였다. 보정은 두 규준의 밀면전단력을 같게 놓고 R_K 에 대한 R_A 의 식으로 정리했다. 식 (4)는 산정식의 차이에 따른 보정식으로써 건물의 평면 치수와 높이에 따른 변수를 고려하였다.

$$R_K = \frac{\left(\frac{0.05h_A}{\sqrt{B_A}}\right)^{2/3}}{1.2 \left(\frac{0.09h_K}{\sqrt{B_K}}\right)^{1/2}} R_A \quad (4)$$

위 식에서, R_K 는 우리나라의 반응수정계수, h_K 는 건축물의 높이(m), B_K 는 건축물의 평면치수(m), R_A 는 ATC에 따른 반응수정계수, h_A 는 건축물의

높이(feet), B_A 는 건축물의 평면치수(feet)를 말한다.

식 (4)를 이용하여 4장의 단순화된 모델에서 산출된 반응수정계수와 5장의 실제 건축 모델에서 산출된 반응수정계수들을 보정하였다. 표 7과 표 8에 보인 바와 같이 보정된 반응수정계수는 해석 대상으로 사용된 모든 건물에 대하여 적은 값을 나타내고 있다.

7. 결 론

본 연구 결과 반응수정계수는 단순화된 모델에서 하부의 골조 부분이 1개 층이며 상부의 벽식 부분이 16개 층인 경우에 최소 값인 2.77을 나타내었으며 실제 건축물에서는 D주상복합 건물이 2.52로써 가장 작게 나타났다. 이들은 몇몇의 매개변수만을 고려한 결과이나 실제 지어진 건축물을 대상으로 해석을 수행하였다는 점에서 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본

표 7 단순화된 모델의 보정된 반응수정계수

	1-14	1-16	1-18	2-14	3-12	3-14	3-16	4-14	5-10	5-12	5-14
반응수정계수	3.7211	3.3292	3.4700	5.6296	7.4447	6.1782	5.0759	4.5311	6.9553	5.8278	4.9990
보정된 반응수정계수	3.0375	2.7735	2.9437	4.6623	6.1277	5.1851	4.3346	3.8498	5.7702	4.9255	4.2963

표 8 실제 건축물들의 보정된 반응수정계수

	A 주상복합	D 주상복합	S 주상복합	X 주상복합
반응수정계수	3.6106	3.2315	3.3907	3.4695
보정된 반응수정계수	2.8046	2.5188	2.7660	2.8075

연구의 범위 내에 해당하는 건축물에 대한 반응수정계수는 2.5가 적정한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 인하여 규준에서 기타구조물에 대해 제시된 반응수정계수 3.5를 본 연구의 대상인 주상복합 건축물에 적용하는 것은 건축물 안전성의 문제를 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 하부골조 부분의 층수와 상부벽 부분의 층수를 매개변수로 하였다. 그러므로 차후에 본 연구에서 고려하지 못했던 몇 가지 매개변수를 포함한 반응수정계수의 제시가 필요하다. 또한 하부골조-상부벽식 주상복합 건축물에 관한 지속적인 연구 및 실험을 통하여 더욱 명확한 반응수정계수의 산정이 요구되어진다. 향후 지속적으로 연구되어야 할 매개변수로는 최하층에 위치하는 전단벽의 양과 위치, 최하층에 위치하는 수직부재들의 강성에 따른 전단력의 강성비, 하부골조 층의 높이에 따른 분석, 하부골조 부분과 상부벽 부분의 비율에 따른 분석 등이 있다.

또한, 본 연구에서는 지반을 고정으로 한정하였으나, 우리나라 건축규준에 제시되어진 지반조건을 감안한다면, 연약지반에서 더 큰 지진력이 발생한다고 보아야 할 것이다. 그러나, ATC에서는 저층벽식 구조물에 대해 연약지반이 압반보다 상대적으로 위험하나 고층건물에서는 단정될 수 없다고 보므로, 지면의 영향 또한 차후과제에 포함되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원한 '복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구'(R&D/ 98-0003)의 일부로써 쌍용건설, 대한주택공사, 코오롱건설 및 형상구조와 공동으로 수행한 연구이다.

참고 문헌

1. ATC(applied technology council), "A critical review of current approaches to earthquake-resistant design," ATC-34, 1995.
2. ATC(applied technology council), "Tenta-

3. ATC(applied technology council), "Structural response modification factors," ATC-19, 1995.
4. ACI 318-95, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, 1995.
5. Federal emergency management agency, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA273)*, 1997.
6. Paulay, T., Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons. INC, 1992, pp. 1-94.
7. Rangan, B. V. and Warner, R. F., *Large concrete Buildings*, Longman Group Limited, 1996.
8. Macleod, I. A., *Analytical Modelling of Structural Systems*, Ellis Hopwood Limited, 1990.
9. Wu, J. and Hanson, R. D., "Study of inelastic spectra with high damping," *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 6, June 1989, pp. 1412-1431.
10. Miranda, E. and Bertero, V. V., "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol. 10, No. 2, 1994, pp. 357-379.
11. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.
12. 구조물의 지진피해 및 보수보강에 관한 연구회, 세계 주요국가 내진설계 기준 요약, 1997.
13. 대한주택공사, 초대형구조시스템 연구센터, 벽식구조 아파트 건물의 반응계수 검증에 관한 연구, 대한주택공사, 1998.
14. 한국지진공학회, 건축물의 내진설계, 1998, pp. 115-269.