

동적 탄소성 지진응답해석에 의한 고층 벽식 아파트의 내진성능 검토

Earthquake Resistant Performance of a High-rise Shear Wall Apartment Based on Nonlinear Time History Response Analysis

강 호 근* 박 성 수** 조 한 우*** 전 대 한****
Kang, Ho Geun Park, Sung Soo Cho, Han Wook Jun, Dae Han

국문요약

본 논문의 목적은 탄소성 지진 응답 해석을 수행하여 고층 벽식 아파트의 내진성능을 평가하는 것이다. 먼저 구조물을 3차원 입체 모델화 하여, 정적 탄소성 해석을 수행하고 층강성 및 항복 충전단력을 평가한 후, 그 결과를 이용하여 집중 질량계 모델을 사용한 시간 이력 지진응답해석을 수행한다. 탄소성 이력 모델로는 bi-linear 모델 및 Clough 모델을, 입력 지진동파형으로는 4종류의 기록 지진동 El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS, Kobe 1995 NS를 사용하고, 입력 지진동의 강도는 최대 지반속도치 12kine이 되도록 크기를 조절하여 입력한다. 탄소성 지진응답 해석결과, 고층 벽식 아파트는 진도 5장도의 지진동 크기에서 진층에 소성변형이 발생하여 취약한 내진성능을 보여준다.

주요어 : 탄소성 질점계 해석, 정적 비선형해석, 시간이력 지진응답해석, 이력 모델

ABSTRACT

Dynamic elastoplastic LPM (lumped parameter mass) analyses are carried out in order to investigate the seismic resistant performance of a typical high-rise shear wall apartment subjected to several earthquakes. Three-dimensional nonlinear pushover analysis is adopted to estimate initial elastic stiffness, yielding strength and post-yielding stiffness of each story for the time history analysis of LPM shear model. For the hysteresis of each story, Clough and bilinear models are used with the input of four recorded earthquake ground motions of El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS and Kobe 1995 NS, of which the amplitudes are scaled down to have the same maximum ground velocity of 12 kine. The result shows that yieldings take place in most stories of the building, i.e. the earthquake resistant capacity of this high-rise shear wall apartment is not sufficient at the event of earthquake M=5~6.

Key words : elastoplastic LPM analysis, nonlinear pushover analysis, time history response analysis, hysteresis model

1. 서 론

최근 구조 공학 기술의 발달과 경제 성장의 여파로 건축물의 경향이 고층화, 다양화, 세장화 되고 있는 추세이다. 현재 고층 아파트 구조

형식인 벽식구조의 내진 안전성 검토는 저층 아파트의 경우 충분히 이루어진 반면^{(1),(2),(9)} 20~30층 규모의 고층 아파트에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 않았다고 볼 수 있다.^{(3),(4),(10)}

벽식구조 고층 아파트는 평면 계획의 용이성과 내부 공간의 효율적 활용 면에서 뛰어나지만 바람이나 지진 등과 같은 수평력에 대하여 다른 구조형식과 상이한 구조적 거동을 나타낸다. 특히, 지진 하중과 같은 동적 하중에 대한 연성 능력이 매우 작은 단점을 가지고 있어, 지진이나 풍하중이

* 정희원 · 거창대학 건축과 조교수, 박사수료

** 정희원 · 부산대 건축공학과 교수, 공학박사

*** 삼성물산(주)건설기술연구소, 공학박사

**** 정희원 · 동서대학교 건설공학부 조교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

중요시되는 고층 아파트의 구조형식으로서 그 타당성이 의문시된다.⁽¹⁰⁾

본 연구는 고층 아파트 구조형식으로 채용되고 있는 벽식구조의 지진시 동적 거동과 내진성능을 파악하는 것이 목적이다. 현재 국내에서 분양되고 있는 일반적인 아파트의 평면형식을 선정하여, 정적 3차원 비선형 해석결과⁽⁷⁾와 직접계 진동모형을 이용하여, 벽식구조 고층 아파트의 동적 탄소성 지진응답해석에 의한 탄소성 거동 특성을 파악한다. 또한 벽식 아파트의 고층화에 따른 내진성능과 내진성능 개선 방향을 알아보는 것이 목적이다.

2. 해석 모델

2.1 평면 형식

국내에서 건설되고 있는 고층 아파트의 평면 형식은 평면 특성상 모든 가구가 일조와 통풍 등의 조건에 유리하다는 장점으로 인하여 일자형 평면이 대다수 건설 회사의 기본 평면으로 채택되고 있다.⁽⁶⁾ 최근 분양면적이 넓은 경우, 그림 1과 같이 엘리베이터 코어를 사이에 두고, 두 세대가 나란히 배치되는 평면 형식도 많이 등장하고 있다. 이와 같은 평면에서는 단변방향(Y방향)에 비하여 장변방향(X방향)이 구조적으로 매우 불리하다.

본 연구에서는 현재 건설되고 있는 아파트 건물 형식 중 구조적으로 매우 불리하다고 사료되는 그림 1과 같은 평면의 25층 건물을 해석 대상으로 선정하여 탄소성 지진응답해석을 수행하여 내진성능을 고찰한다.

2.2 구조 형식의 특징

우리나라 아파트의 평면 특징은 거실과 침실이 있는 정면은 일조와 통풍을 많이 받기 위하여 가능한 한 창문의 면적을 넓게 확보하고, 주방과 작은방이 배치되는 배면은 정면에 비하여 창문을 작게 만들어 난방의 효율성을 높이는 입면을 취하고 있다. 측면은 세대간을 분리하는 벽체로 이루어져 단변방향으로 작용하는 풍하중에 저항하도록 활용되고 있다.

창문이나 개구부가 있는 부위에 설치되는 연결 보를 제외하고는 수평하중과 연직하중에 저항하는 내력벽과 슬래브가 구조 부재의 주류를 이루고 있다. 고층 아파트의 구조형식은 내력벽체와 연결 보로 이루어진 벽식구조이다. 이와 같은 벽식구조는 구조물의 강성과 강도가 매우 높아 풍하중, 적재하중, 고정하중 등과 같은 정적 하중에 대한 저항력은 매우 우수하지만, 지진 하중과 같은 동적 하중에 대한 연성 능력은 매우 취약한 단점을 가지고 있는 것으로 인식되고 있다.⁽¹⁰⁾ 그러므로 지진동에

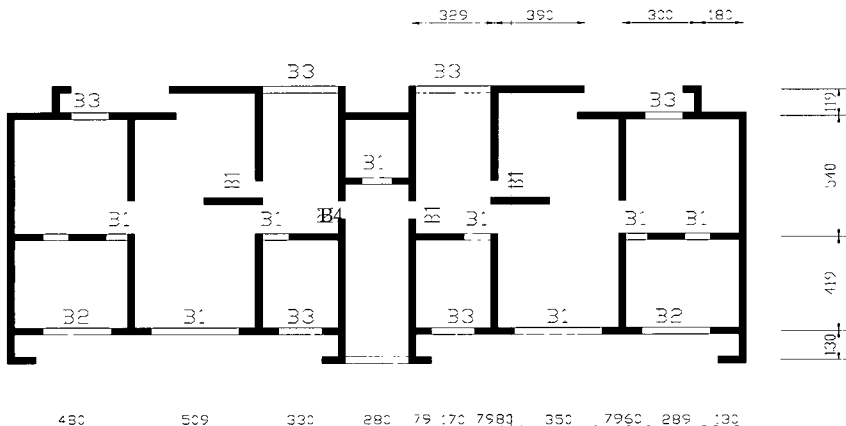


그림 1 해석 모델의 평면도

의한 벽식구조의 동적 거동과 탄소성 영역에서의 지진응답 특성을 검토하여, 내진성능을 명확히 알아 볼 필요가 있다고 사료된다.

2.3 부재 단면

본 해석 모델(그림 1)에 적용된 각 부재 치수는 보의 경우 B1(180×600mm), B2(180×700mm), B3(180×1300mm), B4(180×1800mm) 등이며, 벽의 경우 길이에 관계없이 벽두께 180mm로 동일하다. 기타 배근도는 전대한 등⁽⁷⁾에서 상세히 기술하였으므로 생략한다.

3. 동적 지진 응답 해석

3.1 진동 모델

건물의 탄소성 지진 응답 거동을 간편하게 해석할 수 있는 진동모델로서 각 층에 질량이 집중되어 있다고 가정하는 질점 질량계(lumped mass model) 진동 모델을 이용한다.

지진 응답 해석에는 Rayleigh형 감쇠를 이용하고, 철근콘크리트 건물에 적용되는 감쇠정수는 h=5%를 사용하여 해석을 수행하였다.

3.2 탄성 해석

탄성 지진 응답 해석에 사용한 구조물의 질량 및 초기 강성은 표 1과 같다. 구조물의 각 층의 질량은 단위면적당 중량 1.0ton/m²으로 가정하여 산정하였다. 층별 강성은 수평력으로 내진설계기준의 등가 정적 지진 하중 분포를 작용시켜 얻어진 층간변위-층전단력 관계로부터 계산한 것이다.⁽⁷⁾

3.3 탄소성 해석

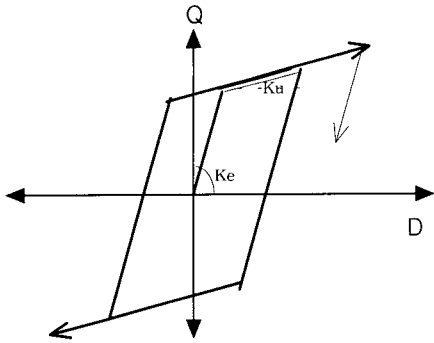
탄소성 지진 응답 해석은 탄성 해석의 진동 모델을 그대로 사용하고, 탄소성 복원력 모델에 대한 변수를 부가하여 해석을 수행한다. 여기서 사용한 탄소성 복원력 모델은 그림 2와 같이 bi-linear 이력모델 및 Clough 이력모델을

표 1 탄소성 응답 해석용 변수

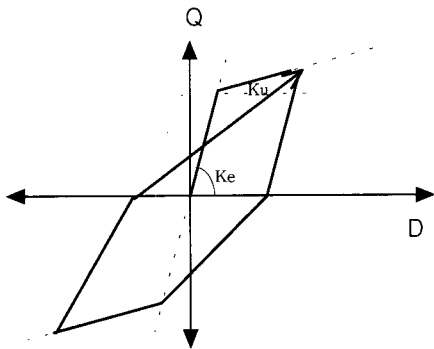
층 FL.	층고 H(m)	무게 W(ton)	항복 층전단력 Qy(ton)	항복변위 Dy(cm)	초기강성 Ke(t/cm)	항복후 강성 Ku(t/cm)
25	2.80	407.11	56.62	0.205	276.19	2.762
24	2.80	407.11	110.10	0.216	509.79	5.098
23	2.80	407.11	161.86	0.237	684.31	6.843
22	2.80	407.11	212.07	0.265	799.05	7.991
21	2.80	407.11	261.85	0.299	875.77	8.758
20	2.80	407.11	299.43	0.304	984.71	9.847
19	2.80	407.11	337.49	0.324	1042.90	10.429
18	2.80	407.11	372.40	0.344	1081.77	10.818
17	2.80	407.11	404.26	0.365	1108.60	11.086
16	2.60	392.46	432.10	0.378	1141.87	11.419
15	2.60	392.46	457.38	0.400	1142.89	11.429
14	2.60	392.46	484.15	0.421	1150.08	11.501
13	2.60	392.46	500.57	0.420	1191.56	11.916
12	2.60	392.46	515.20	0.416	1239.33	12.393
11	2.60	392.46	530.07	0.419	1266.03	12.660
10	2.60	392.46	542.80	0.418	1299.38	12.994
9	2.60	392.46	553.50	0.413	1340.74	13.407
8	2.60	392.46	562.28	0.404	1392.88	13.929
7	2.60	392.46	568.30	0.389	1460.41	14.604
6	2.60	392.46	574.59	0.375	1532.85	15.329
5	2.60	392.46	577.41	0.347	1665.20	16.652
4	2.60	392.46	577.82	0.311	1859.43	18.594
3	2.60	392.46	576.10	0.266	2162.52	21.625
2	2.60	392.46	572.32	0.202	2826.58	28.266
1	2.60	392.46	575.71	0.120	4809.87	48.099

사용하고, 수치 적분의 적분 시간은 0.005sec 간격으로 해석을 수행하였다.

복원력 모델의 항복 층전단력(Qy)은 정적 탄소성 해석결과⁽⁷⁾로부터 산정하였다. 정적 탄소성 해석에서 얻어진 층별 층간변위-층전단력 관계 곡선으로부터⁽⁷⁾, 그림 3과 같이 복원력 모델의 골격 곡선을 두 개의 직선으로 단순화하여 탄소성 응답 해석용 복원력 모델을 작성한다. 항복점의 위치는 탄소성해석에서 얻은 곡선의 접선 강성이 초기강성의 30%로 저하한 점으로 가정하였다. 초기 강성(Ke)은 탄성 해석시의 강성을 그대로 사용하고, 항복 후 강성(Ku)은 층간변위-층전단력 관계 곡선으로부터 초기 강성의 1%로 가정하여 해석을 수행한다. 복원력 모델에 대한 변수를 표 1에 나타낸다. 또한 Clough 모델의 강성 저하 계수는 0.3을 사용하였다.



(a) Bi-linear model



(b) Clough model

그림 2 탄소성 해석용 복원력 모델

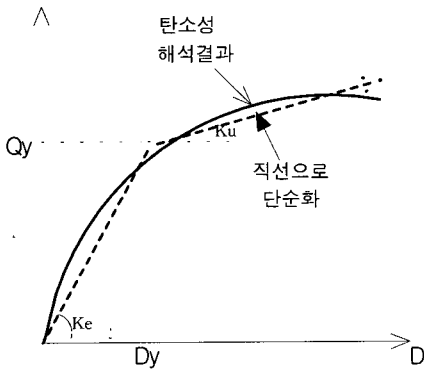
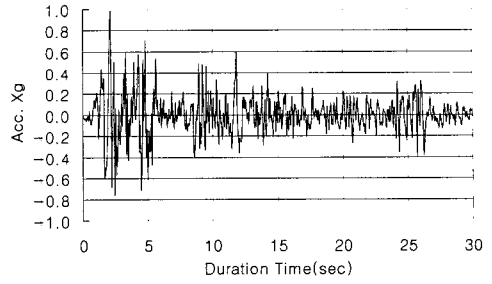


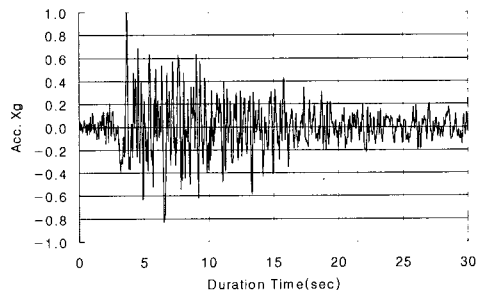
그림 3 복원력 모델의 골격 곡선의 단순화

4. 입력 지진동

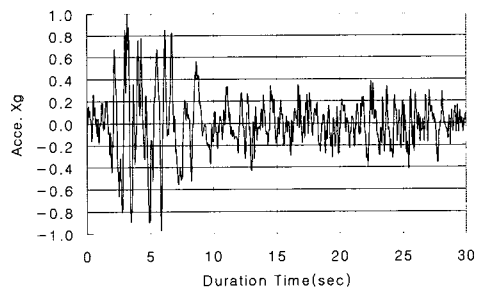
탄성 및 탄소성 지진 응답 해석에 사용하는 입력 지진동은 그림 4(a)~(d)와 같이 과거의 지진에서 기록된 El Centro 1940 NS, Taft 1952EW,



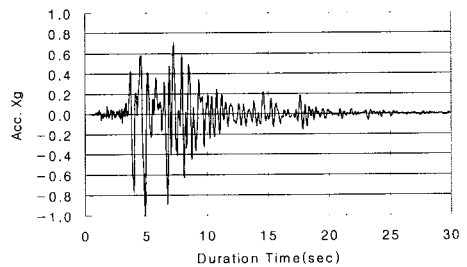
(a) El Centro 1940 NS 성분의 시간 이력



(b) Taft 1952 EW 성분의 시간 이력



(c) Hachinohe 1968 EW 성분의 시간 이력



(d) Kobe 1995 NS 성분의 시간 이력

그림 4 입력 지진동 파형의 시간이력

Hachinohe 1968 EW, Kobe 1995 NS 등 4종류의 지진동 파형을 선정하여 해석을 수행한다. 각 지진동 파형의 시간 이력 파형을 그림 4에 나타낸다. 또한 탄성 속도응답 스펙트럼을 그림 5에 나타낸다.

과거의 지진 기록에서 얻어진 지진동 파형은 각 지진동의 강도가 일정하지 않기 때문에 입력 지진동의 강도를 일정하게 표준화 하여 입력하여야 한다. 본 해석에서는 비교적 표준화 방법이 용이하고, 장주기 건물의 표준화 방법으로 많이 이용되는 절대 속도치를 동일하게 하여 각 지진동 파형의 강도가 일정하도록 표준화 하였다. 각 지진동 파형의 최대 지반 가속도의 절대치, 최대 지반 속도의 절대치, 스펙트럼 밀도를 표 2에 나타낸다.

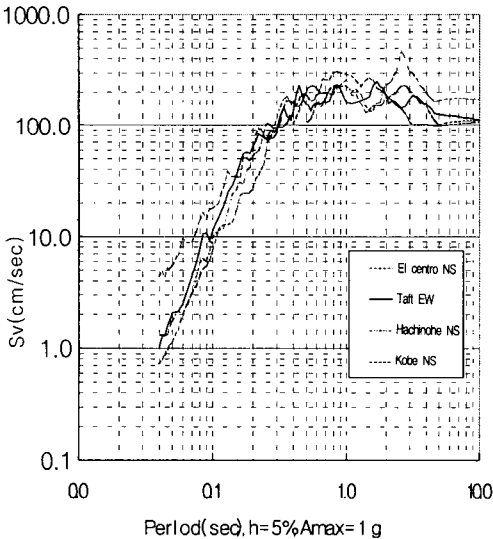


그림 5 입력 지진동의 속도 응답 스펙트럼 곡선

표 2 입력 지진동의 성질

입력 지진동	최대 지반 가속도(gal)	최대 지반 속도(kine)	스펙트럼 밀도'(cm)
El Centro NS	314.7	33.5	140.6
Taft EW	174.8	17.7	65.7
Hachinohe NS	225.0	34.1	103.8
Kobe NS	818.02	90.9	412.1

* 감쇠정수 $h=5\%$ 일 때,

$$\text{Housner의 스펙트럼 } SI = \int_{0.1}^{2.5} (S_v) dT$$

5. 해석 결과 및 고찰

5.1 고유 주기 및 고유 모드

동적해석에서 고유 주기 및 고유 모드는 구조물의 동적 성질을 나타내는 기본 요소라고 할 수 있다. 구조물을 구성하는 층의 질량과 구조 부재의 강성에 의해 산정되는 이들 요소는 구조물이 가지는 고유의 진동 특성이기 때문에 먼저 구조물의 동적해석 모델의 타당성을 판단하고, 구조물의 강성 및 질량 분포의 적합성을 나타내는 척도로 이용될 수 있다.

정적 탄성 해석의 3차원 입체해석 프로그램 MIDAS-BDS에서 얻어진 고유치 해석 결과^{(7),(8)}와 본 해석의 질점계 진동 모델에 의한 고유치 해석 결과를 비교하여, 질점계 진동 모델의 타당성을 검증한다. 탄성 해석 프로그램 BDS는 구조물 전체의 입체해석 모델로 구성된 강성 매트릭스를 이용하여 고유치 해석을 수행하기 때문에 실제 구조물의 동적 거동 특성을 가장 잘 반영하는 해석 수법이라고 볼 수 있다. 그러나 본 해석에서 사용한 질점계 진동 모델은 입체 구조물의 정적 탄소성 해석결과로부터 얻어진 층간변위-층전단력 관계로부터 층 강성을 얻어, 1방향만을 고려한 층 강성 매트릭스를 작성하여 고유치 해석을 수행하기 때문에 실제적으로 3차원 입체모드의 진동특성이 고려되지 않는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 진동 모델은 입체 해석 모델에 비하여 진동 모델화에서 오차를 내포하고 있다. 따라서 이들 해석결과를 비교하여 진동 모델에 따른 해석 방법의 타당성을 먼저 검증한다. 참고로 정적 탄소성 해석 프로그램인 CANNY에서 얻어진 고유주기도 함께 표기하였다.⁽⁷⁾ CANNY에서는 벽체를 선재로 치환한 모델화 방법을 적용하고 있으므로, 유한요소모델을 적용한 MIDAS-BDS 및 집중 질점계(LPM) 진동 모델과 서로 비교하여 타당성을 검증할 필요가 있다.

각 진동 모델에 의한 고유 주기를 비교하면 표 3과 같다. 또한 그림 6은 고유 모드를 비교하여 나타낸 것이다. 이들 표 및 그림에서 알 수 있는 바와 같이 1차 고유 주기 및 고유 모드는 각 진동 모델 모두 유사한 해석 결과를 나타내고 있다. 그러나 2차 이상의 고유 주기 및 고유 모드에서는 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 전체 구조물의 입체 해석 모델에 의한 고유치 해석은 비틀림 진동의 영향이 포함되어 있기 때문에 2차 진동 모드 이후에는 비틀림 모드의 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 비틀림의 영향이 작은 단변방향에서는 고차 모드에서도 유사한 진동 모드를 나타낼 것으로 판단된다. 특히 탄성해석 프로그램인 MIDAS-BDS의 해석결과와 탄소성 해석 프로그램의 CANNY 해석결과는 매우 유사한 진동 특성을 보여주고 있다. 이것은 탄소성 해석 프로그램⁷⁾에 사용된 부재 모델화가 매우 타당성이 있다는 것을 입증하는 것이다.

표 3 해석 방법에 따른 고유 주기의 비교(sec)

해석 방법	1차	2차	3차	4차	5차
MIDAS-BDS	1.483	0.379	0.182	0.114	0.0799
Lumped mass	1.686	0.608	0.384	0.281	0.2230
CANNY-E	1.419	0.420	0.213	0.136	0.0971

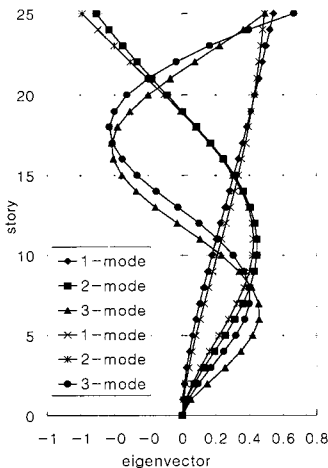
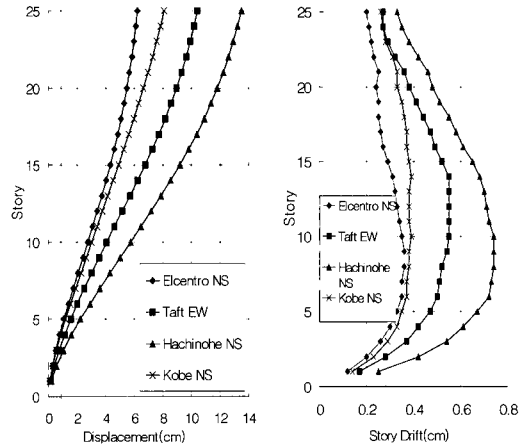


그림 6 고유 모드의 비교

5.2 탄성 지진 응답 해석

입력 지진동의 최대 지반 속도(12kine)를 일정하게 표준화 하여 다질점계 진동 모델에 대한 지진 응답 해석을 수행하여 얻어진 결과를 그림 7에 나타낸다.



(a) 층변위 분포

(b) 층간 변위 분포

그림 7 탄성 지진응답 해석결과

입력 지진동의 성질에 따라 층변위 분포, 층간변위 분포 등의 응답이 매우 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 입력 지진동의 응답 스펙트럼 특성에 기인하는 것으로, 일반적으로 지진동 파형이 가진 주기성분과 진동모델의 고유주기의 영향을 많이 받게된다. 즉, 지진동의 탁월 주기성분과 건물의 고유주기가 근접하는 경우에는 탄성 응답치는 증가하고, 그렇지 못한 경우에는 응답치가 상대적으로 줄어든다.

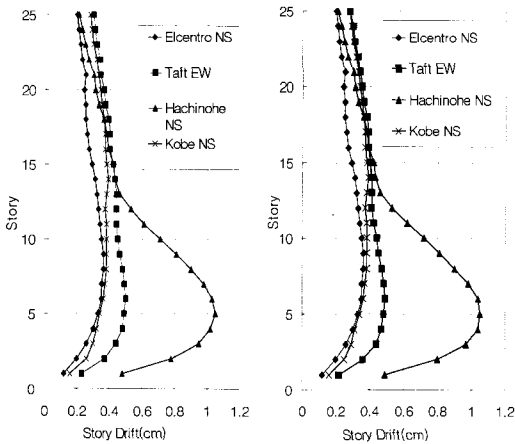
5.3 탄소성 지진 응답 해석

탄소성 지진 응답 해석에서 이용한 입력 지진동의 강도는 국내의 내진설계 기준을 참고하여, 최대 지반 속도값 12kine으로 입력하였다.

탄소성 지진 응답 해석 결과를 그림 8과 그림 9에 나타낸다. 탄소성 지진 응답 해석에서도 탄성 해석에서와 마찬가지로 지진동의 특성에

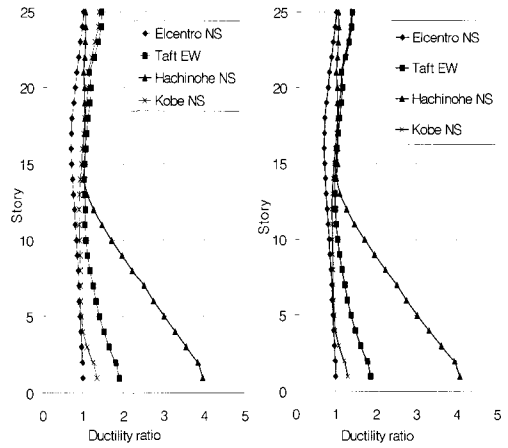
따라 응답치의 변동이 매우 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 탄소성 이력 모델의 차이에 따른 응답치의 변화는 거의 없다. 이것은 bi-linear 모델과 Clough 모델은 유사한 이력 에너지 소비능력을 가지고 있기 때문이다. 그림 9에서 입력 지진동의 강도가 12kine에서 거의 모든 층이 항복 내력을 넘어 소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있다. 특히 장주기 성분이 우세한 Hachinohe NS 지진동의 경우, 13층 이하에서는 층 응답 소성율이 매우 크게 나타나고 있다. 이것은 국내의 내진설계 기준의 등가 정적 수평하중으로 설계된 벽식 아파트 건물은 같은 크기의 동적하중을 입력한 동적 지진응답 해석에서는 지진동의 특성에 따라 큰 소성 변형을 일으킬 수 있다는 것을 보여준다.

우리 나라 내진설계 기준의 지진하중으로 설계되고 있는 벽식 아파트에 대하여, 비교적 탄소성 동적거동 특성을 간략히 파악할 수 있는 전단형 진동모델을 이용한 동적 탄소성 지진응답 해석결과, 등가정적 지진하중과 동등한 크기의 입력 지진동에 대하여 층 항복이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 벽식 아파트와 같은 고층건물의 내진성능을 높이기 위해서는 동적거동 특성을 반영한 등가 정적 지진하중에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.



(a) Bi-linear Model (b) Clough Model

그림 8 탄소성 지진 응답 해석에 의한 층간 변위 분포



(a) Bi-linear Model (b) Clough Model

그림 9 탄소성 지진 응답 해석에 의한 층 소성율 분포

5.4 동적해석에 의한 평가

기록 지진동 파형을 입력한 탄소성 지진 응답 해석을 수행한 결과, 본 해석 대상 건축물은 입력 지진동의 강도를 최대 지반 속도로 평가할 경우, 12kine 정도에서 거의 모든 층에서 소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있다. 입력 지진강도 12kine을 최대 지반 가속도로 환산한 경우 0.12g(중력 가속도 $g=980\text{cm}/\text{sec}^2$) 정도로 볼 수 있다. 이 값은 국내의 내진설계 기준에서 규정하고 있는 밀면 전단력 계수에 해당한다. 즉, 국내 내진설계 기준의 밀면 전단력 계수에 해당하는 입력 지진동에서도 구조물에 소성 변형이 일어난다고 볼 수 있다.

따라서, 본 해석에서 대상으로 한 벽식 고층 아파트의 경우, 지진 규모 $M=5\sim6$ 정도에서 손상이 발생하는 해석결과를 보여준다.

6. 결 론

우리 나라에서 고층 아파트 구조 형식으로 채용되고 있는 벽식구조의 내진 안전성을 파악하기 위해 현재 국내에서 분양되고 있는 일반적인 아파트 평면 형식을 선정하여, 동적해석에 의한 탄소성 거동 특성을 파악한 결과,

다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동적해석에서 진동 모델에 따른 고유치 해석 결과, 1차 고유모드는 진동 모델에 관계없이 유사한 결과를 나타내며, 2차 이상의 고유모드는 큰 차이를 나타낸다. 이것은 전체 구조물에 대한 입체 해석 모델에 의한 고유치 해석은 비틀림 진동의 영향이 포함되어 있기 때문에 2차 진동 모드 이후에는 비틀림 성분의 영향이 큰 것으로 판단된다. 비틀림의 영향이 미소한 단변방향에서는 고차 모드에서도 유사한 진동 모드를 나타낼 것으로 판단된다.
- (2) 탄성 지진 응답 해석에 있어 다질점계 진동 모델에 대한 지진 응답 해석 결과, 입력 지진동의 성질에 따라 층변위 분포, 층간변위 분포, 층전단력 분포 등의 응답치가 큰 차이를 보인다. 이것은 입력 지진동의 응답 스펙트럼 특성에 기인하는 것으로 일반적으로 지진동 파형에 포함된 주기성분의 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다.
- (3) 탄소성 지진 응답 해석에서 최대 지반 속도 12kine으로 규준화 하여 건물의 응답을 검토한 결과, 전 층에서 항복 내력을 넘어 소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 대한주택공사, "공동주택의 내진성능향상을 위한 구조 계획 기법 연구", 1987.
2. 대한주택공사, "아파트 건물의 구조 형식에 관한 연구", 1990.
3. 한국건설기술연구원, "초고층 아파트 최적 구법 개발(II)", 1991.
4. 대한주택공사, "고층 아파트 부품화 기술 개발(II)", 1992.
5. 대한건축학회, "내진설계 지침서 작성에 관한 연구", 1987.
6. 대한건축학회, "철근콘크리트 내력벽식 건축물 구조 설계 지침(안)", 1992.
7. 전대한, 강호근, 조한욱, 이정원, "정적 탄소성 해석에 의한 고층 벽식 아파트의 수평내력 검토", 한국지진공학회는문집, 제2권, 제 4호, 1998. 12, pp. 31~40.
8. 포스코 개발주식회사, "MIDAS-BDS user's manual Vol. I," 1996.
9. 日本建築センター, "壁式鐵筋コンクリト造設計施工指針", 1984.
10. 日本建築センター, "中高層壁式鐵筋コンクリト造設計施工指針・同解説", 1987.
11. 小谷俊介, "RC造建築物の地震應答解析の現狀と問題點", 콘크리트工學, Vol. 31, No. 8, 1993, pp. 15-23.
12. Li, K. N., "CANNY-E : Three-dimensional nonlinear dynamic structural analysis computer program package-users manual," CANNY Consultants PTE. LTD., Singapore, 1996.
13. Li, K. N., "CANNY-E : Three-dimensional nonlinear dynamic structural analysis computer program package-technical manual(Part I)," CANNY Consultants PTE. LTD., Singapore, 1996.