입체 복합구조물의 하부골조 층수 변화에 따른 비선형 거동특성

The Nonlinear Behavior Characteristics of the 3D Mixed Building Structures with Variations in the Lower Stories

강 병 두* 전 대 한** 김 재 웅***
Kang, Pyeong Doo Jun, Dae Han Kim, Jae Ung

국문요약

상부벽식-하부골조 구조(복합구조)는 일반적으로 전이층을 중심으로 상부는 주거공간의 전단벽식의 고층아파트이고 하부는 상업공간의 보-기둥의 골조구조이다. 이러한 구조물은 구조형식의 특성상 강성비정형, 질량비정형, 기하학적 비정형 등 비정형 형태의 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 하부골조 구조물의 층수가 변화할 경우에 대해 복합 구조물의 비선형 거동특성과 내진성능을 파악하였다. 비선형 해석결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다. 1) 비선형 정적해석의 최상층변위각과 밑면전단력계수로부터 하부구조의 층수가 증가할 경우 구조물의 밑면전단력계수는 감소하였으나 최상층변위각은 증가하였다. 2) 하부구조의 층수가 증가할 경우 상부벽식 구조의 층간변위각과 소성율은 감소하였으며, 상부벽식은 탄성상태에 가까운 거동을 하였다. 3) 하부구조의 층수가 증가할 경우 하부구조에서 층간변위각이 집중적으로 증가하였다.

주요어 : 복합구조물, 비선형 정적해석, 비선형 동적해석, 층간변위각, 층지진하중, 소성율

ABSTRACT

The upper wall-lower frame structures(mixed building structures) are usually composed of shear wall structure in the upper part of structure which is used as residential space and frame structure in the lower part of structure which is used as commercial space centering around the transfer system in the lower part of structure. These structures are characteristic of stiffness irregularity, mass irregularity, and vertical geometric irregularity. The purpose of this study is to investigate the nonlinear response characteristics and the seismic capacity of mixed building structures when the number of stories in the lower frame is varied. The conclusions of this study are following. 1) As the result of push-over analysis of structure such as roof drift(i.e. roof displacement/structural height) and base shear coefficient, when the stories of lower frame system are increased, base shear coefficient is decreased, but roof drift is increased. 2) According to an increase in stories of the lower frame, story drift and ductility ratio of upper wall system are decreased and behavior of upper wall system is closed to elastic. 3) When the stories of lower frame system are increased, the excessive story drift is concentrated on the lower frame system.

Key words : mixed building structure, push-over analysis, nonlinear time history analysis, story drift, floor level lateral force, ductility ratio

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

상부벽식-하부골조 구조로 이루어진 복합구조물은 일반적으로 전이층을 중심으로 상부는 주거 기능을 위한 전단벽식의 고층아파트이며, 하부는 상업용 공간이나 주차장으로 활용하기 위한 보-기둥의 골조 구조이다. 복합구조물은 일반적으로 상·하부 구조물의 강성과 질량차이로 인해 강성비정형과 질량비정형 구조물이 되고, 또한 상부벽식 구조(이하 상부구조)가 하부골조 구조(이하 하부구조)에 비해 setback 된 구조형식을 가진 기하학적 비정형 구조물이 된다. 이러한 비정형 형태의 구조물은 구조물의 형상과 횡하중 저항 시스템에 구조적인 영향을 줄 수 있는 수준의 불연속성을 가지는 수직비정형 구조물[1]로써 횡하중이 작용할 경우 하부구조에 변위 등의 응답이 집중되는 것으로 알려져 있다.

복합구조물이 그 기능을 발휘하고 공간을 충분히 활용하기 위해서는 횡하중에 대한 구조물의 거동과 구조적 성능에 대한 명확한 이해와 검증이 필요하다. 선형탄성해석만으로는 이러한 구조물의 실제 성능을 제대로 평가할 수 없으며, 비선형 해석을 통해 항복이후의 구조물의 변위 등의 성능을 평가할 수 있다. 복합구조물의 구조성능을 살펴본 기존의 연구는 2차원 모델에 대한 비선형 해석[2]과 3차원의 탄성해석에 대한 결과를 고찰[3]한 것은 있으나, 복합구조물의 거동특성과 내진성능을 보다 정확하게 파악하기 위한 3차원 비선형 응답특성에 대한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 복합구조물의 거동에 영향을 줄 수 있는 변수 중 하나인 하부구조의 층수를 변화시켜 복합구조물의 3차원 입체 비선형 해석을 하고자 한다. 해석결과로부터 하부구조의 층수가 변화할 경우 상부구조와 하부구조의 비선형 응답 관계와 복합구조물의 비선형 거동특성을 비교·분석하여 설계실무에 기초자료의 제시와 내진성능을 파악하고자 한다.

1.2 연구방법 및 내용

상부벽식-하부골조 구조로 이루어진 복합구조물의 비선형 거동특성과 내진성능을 고찰하기 위해 해석모델을 선정하고,

* 정회원·거창전문대학 건축과 조교수, 박사수료(대표저자 : pdkang@kc.ac.kr)
** 정회원·동서대학교 건설공학부 조교수, 공학박사
*** 동아대학교 건축학부 교수, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 1. 22 / 심사종료일 : 2002. 2. 14)

탄성설계용 범용프로그램인 MIDAS/GENw Ver. 4.3.2[4]를 사용하여 부재의 단면 크기와 철근 배근을 결정하였다. 탄성설계된 부재로부터 비선형 해석에 사용될 각 부재의 단면내력을 산정하였으며, 3차원 입체비선형 해석용으로 개발된 범용프로그램인 CANNY 99[5],[6]를 사용하여 구조물에 대한 비선형 해석을 하였다. 본 연구에서 사용한 비선형 해석은 비선형 정적해석(push-over analysis)과 비선형 동적해석(nonlinear time history analysis)이다. 이러한 비선형 해석은 탄성해석에서 파악할 수 없는 부재의 소성과 내진성능 등을 명확히 파악할 수 있으며 탄성설계된 구조물의 안전도를 확인할 수 있다. 그리고 비선형 설계를 통해 취약한 부재에 대해서는 성능을 향상시키거나 과다안전 설계된 부재는 단면을 변경함으로써 보다 안전하고 경제적인 구조물을 만들 수 있다.

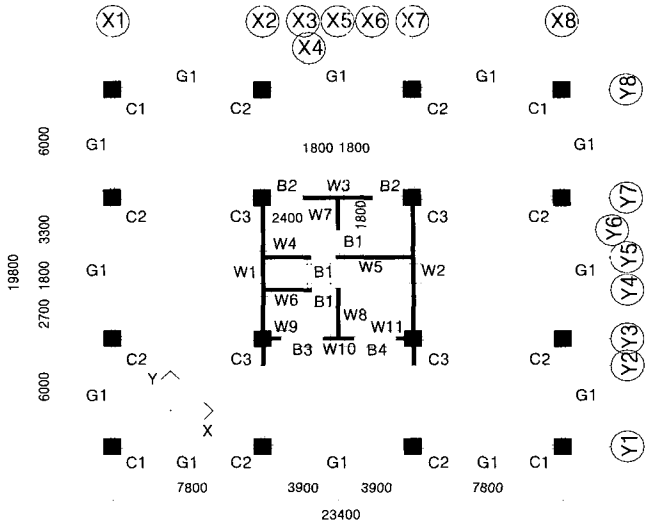
비선형 정적해석에서는 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 작용수평하중 분배방법을 적용하여 해석을 수행하였으며, 구조물의 내진성능과 하부구조의 층수변화에 대한 구조물의 응답특성 등을 고찰하기 위해 층간변위각과 밑면전단력을 기준으로 복합구조물의 최상층변위각과 밑면전단력계수, 층간변위각 및 소성율 등의 관점에서 분석하였다. 비선형 동적해석에서는 널리 사용되고 있는 지진동에 대해 구조물을 해석하였다. 입력지진동에 대해 구조물의 최대 층지진하중과 소성율 등의 관점에서 하부구조의 층수가 변화할 경우 구조물의 비선형 동적응답특성을 고찰하였다.

2. 탄성 해석 및 설계

2.1 해석모델

본 연구에서 사용한 해석모델은 그림 1과 같은 평면으로 구성되고 표 1과 같이 상부구조의 층수는 동일하지만 하부구조의 층수가 변화하는 3가지이다. 상부구조는 1세대로써 모든 모델에서 층수와 부재의 치수를 동일하게 하였으며, 모델의 평면은 국내에 건설된 평면을 참조하였다. 전이층의 형식은 전이보(transfer girder)이고 그림 1에서 점선으로 표시하였다. 하부구조의 경우 상부구조에 대해 X, Y방향으로 1경간씩 추가하여 3경간이 되게 하였으며, 입면적으로 setback이 되는 형식이다. 이러한 해석모델은 연구목적의 적정한 범위 내에서 비선형 해석의 계산량과 모델링하는 과정에서의 오류와 복잡함을 줄이고, 연구하고자 하는 변수에 대한 해석결과를 명확하게 나타내고자 실제복합구조물을 간략하게 이상화시킨 가상모델이다.

상부구조의 층고는 벽식 구조의 일반적인 층고인 2.8m로 모든 모델이 동일하고, 하부구조의 층고는 상가건물의 특성을 고려하여 4.5m로 동일하게 하였다. 또한 전이보(TG1)의 단면크기는 상부구조의 층수가 동일하고 모델링의 편의를 위해 전이보의 춤은 상부층수의 1/10(m), 폭은 춤의 35% 정도인 550×1500㎜를 모든 모델에 대해 동일하게 사용하였다. 보의 경우 전이층의 TG1 이외의 보와 하부구조의 보는 그림 1과 표 2에서 G1, G2와 같이 두 가지로 구분하여 설계하였으



* TG1 : Pit층의 모든 transfer girder, G2 : 하부골조의 표기없는 모든 보

그림 1 해석모델의 평면도

표 1 해석모델

모델	상부구조 층수	하부구조 층수	전체 층수	전체 높이(m)	중량 (kN)
ML1	16	3	19	58.3	29,420
ML2		5	21	67.3	39,053
ML3		7	23	76.3	49,524

나, 부재의 크기는 동일하다. 기둥의 크기는 상부구조 하부에 위치하는 기둥(C3)은 1000×1000mm으로 동일하게 하였으나, 그 외의 기둥(C1, C2) 크기는 표 3에 나타난 것처럼 모델에 따라 변화시켰다. 상부구조의 벽체 단면크기는 표 4에 나타난 것처럼 외부 벽체 두께는 20cm이고, 내부 벽체 두께는 18cm로써 내진설계규준을 만족하도록 설계하였다. 벽체 양단부는 단부 기둥의 역할을 발휘할 수 있도록 기둥과 같이 띠철근을 사용하여 보강하였다. 사용재료의 특성 중 콘크리트의 설계기준강도는 f_{ck}=23.5MPa이며, 철근의 항복응력은 D16 이상에서 f_y=392MPa, D13 이하에서 f_y=294MPa이다.

2.2 설계하중

구조물의 탄성해석 및 단면설계를 위한 하중들 중에서 초기 부재단면설계를 위하여 고정하중, 적재하중, 등가정적지진하중 및 풍하중이 적용되었으며, 예제 구조물의 단면설계용 하중조합은 대한건축학회 제정의 하중기준[1]을 따랐다. 표 2~4는 아래와 같은 하중조건으로 한국콘크리트학회 콘크리트 구조설계기준[7]에 따라 MIDAS를 사용하여 탄성설계된 모델의 부재치수와 배근을 나타낸 것이다. 이러한 부재 치수와 철근 배근은 일반적으로 설계되고 있는 실무 자료들을 분석하여 내진설계규준을 만족하도록 설계되었다. 상부구조의 층수는 동일하나 하부구조의 층수가 변화하기 때문에 전체 구조물의 층수가 가변적이다. 따라서 모델에 대해 동일한 층수로 표현하기가 곤란하므로 표 4에서처럼 상부구조를 상부(7개층), 중간(6개층), 하부(3개층)의 세 부분으로 나누어 표현하였다.

표 2 보배근 리스트

Models	Gir. ID	Story No.	Size (mm)	Main bars		Stirrups	
				End	Cent.	End	Cent.
ML1	G1	2F~전이층	400×600	6-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
				2-HD22	3-HD22		
	G2	2F~전이층	400×600	8-HD25	2-HD25	D10@200	D10@250
				2-HD25	3-HD25		
ML2	G1	2F~전이층	400×600	8-HD22	3-HD22	D10@200	D10@250
				4-HD22	3-HD22		
	G2	2F~전이층	400×600	7-HD29	2-HD29	D10@200	D10@250
				3-HD29	3-HD29		
ML3	G1	2F~전이층	400×600	8-HD22	3-HD22	D10@200	D10@250
				4-HD22	3-HD22		
	G2	2F~전이층	400×600	8-HD29	3-HD29	D10@200	D10@250
				3-HD29	5-HD29		
ML1~ML3	TG1	전이층	550×1500	11-HD29(all)		HD19@200, HD19@200*	
				11-HD29(all)			
B1(180×580), B2(180×1300), B3(180×1000), B4(180×320)은 상부구조(전이층 상부~RF)의 연결보이며, 보배근은 모든 보가 동일하게 상부주근 4-HD16, 하부주근 4-HD16, 그리고 늑근은 전구간 D10@200이다.							

* 수평전단보강근

표 3 기둥배근 리스트

Models	Col. ID	Story No.	Size(mm)	Main bars	Ties
ML1	C1, C2	1F~전이층	600×600	12-HD22	D10@200
	C3	1F~전이층	1000×1000	32-HD25	D10@200
ML2	C1, C2	1F~전이층	700×700	14-HD22	D10@200
	C3	1F~전이층	1000×1000	40-HD25	D10@200
ML3	C1, C2	1F~전이층	800×800	18-HD22	D10@200
	C3	1F~전이층	1000×1000	42-HD25	D10@200

고정하중과 적재하중은 각 모델에 대하여 상부구조는 5.88kPa과 1.96kPa, 하부구조는 5.49kPa과 3.43kPa로 하였다. 하중기준에 의한 등가정적지진하중을 산정하기 위해서 지역계수(A) 0.11, 중요도계수(I_E) 1.5, 지반계수(S) 1.0, 기본진동주기는 기타구조의 진동주기 산정식을 사용하였으며, 반응수정계수(R) 3.0으로 하여 해석을 수행하였다. 풍하중 산정은 하중기준에 의해 계산되었으며 노풍도 구분 A의 대도시 중심부에 10층 이상의 대규모 고층건축물이 밀집해 있는 지역으로 기본풍속은 40m/sec이며, 지형에 의한 풍속할증계수는 1.0, 건축물의 중요도계수는 15층 이상 아파트의 경우로 1.10의 값을 사용하였다.

3. 비선형 해석

3.1 기본 가정

구조물의 비선형 응답을 파악하기 위하여 부재모델을 이용한 3차원 입체해석모델을 사용하였다. 모델은 기초 위에 고정되어 있고, 각 층의 바닥은 강막작용을 하는 것으로 가정하였으며, P-Δ 효과를 고려하였다. 보-기둥 접합부는 강절로 가정하였다. 구조물의 자중은 비선형 해석을 수행하기 전에 초기하중으로 고려하였고, 비선형 해석을 위한 작용수

표 4 벽배근 리스트

Models	Wall ID	Thk. (mm)	Story No.*	Ver. bars**	Hor. bars**	Edge bars
ML1	W1, W2	200	상부	D10@400	D10@400	4-HD16
			중간	D10@200	D10@200	4-HD16
			하부	D13@200	D10@200	4-HD16
	W3	180	상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D13@400	D10@300	4-HD16
			하부	D13@200	D10@300	4-HD16
	W5		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D13@200	D10@300	4-HD16
			하부	D16@100	D13@150	4-HD16
	W7		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@400	D10@300	4-HD16
			하부	D13@400	D10@300	4-HD16
ML2	W1, W2	200	상부	D10@400	D10@400	4-HD16
			중간	D10@200	D10@200	4-HD16
			하부	D10@200	D10@200	4-HD16
	W3	180	상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@400	D10@300	4-HD16
			하부	D10@200	D10@300	4-HD16
	W5		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@200	D10@300	4-HD16
			하부	D16@100	D13@150	4-HD16
	W7		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@400	D10@300	4-HD16
			하부	D10@200	D10@300	4-HD16
ML3	W1, W2	200	상부	D10@400	D10@400	4-HD16
			중간	D10@200	D10@200	4-HD16
			하부	D13@200	D10@200	4-HD16
	W3	180	상부	D10@300	D10@300	4-HD16
			중간	D10@300	D10@300	4-HD16
			하부	D13@200	D10@300	4-HD16
	W5		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D13@200	D10@300	4-HD16
			하부	D16@100	D13@150	4-HD16
	W7		상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@400	D10@300	4-HD16
			하부	D10@200	D10@300	4-HD16
ML1~ML3	W4, W6, W8	180	상부	D10@400	D10@300	4-HD16
			중간	D10@400	D10@300	4-HD16
			하부	D16@150	D10@150	4-HD16
	W9~W11		4F~RF	D13@300	D10@300	4-HD16

* 상부, 중간, 하부는 상부구조 16개층 중에서 각각 상부 7개층, 중간 6개층, 하부 3개층을 의미함, ** 복배근

평하중은 고차모드의 영향을 고려하여 분포시켰다.

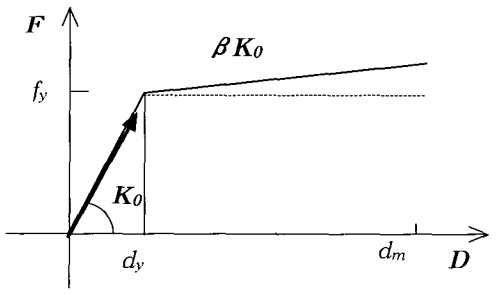
3.2 요소모델 성격[5],[6]

비선형 해석을 위해 사용된 보, 기둥의 모델화 방법은 부재 단부에 두 개의 휨 스프링, 부재 중앙부의 전단과 축 스프링에 의해 비선형 일축스프링으로 이상화하였다. 보의 축변형은 고려되지 않았으며, 기둥의 축변형은 탄성변형으로 가정하였다. 전단벽 모델은 전단벽의 상·하부에서는 무한강성을 갖는 판넬 보가 위치하는 것으로 가정하며, 판넬변형을 나타내기 위해 면내 축스프링, 회전스프링, 전단스프링이 사용되었다. 면외강성은 무시하였다.

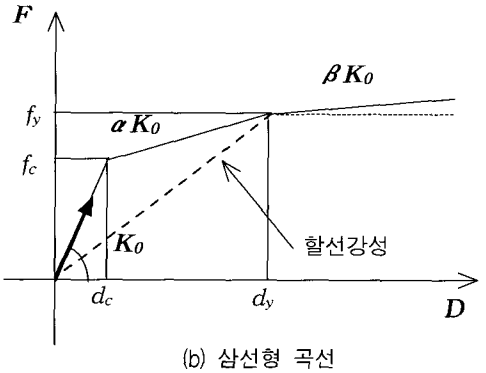
3.3 골격곡선 및 이력곡선

본 연구에서 사용한 골격곡선(skeleton curve)은 휨변형에 대해서는 이선형(bi-linear, 그림 2(a)), 전단변형은 삼선형(tri-linear, 그림 2(b))이며, 축변형은 탄성 모델의 골격곡선을 사용하였다. 휨변형(그림 2(a))에 대한 항복후 강성계수(β)는 철근콘크리트 부재의 휨이론을 적용하여 계산하였으며, 전단변형(그림 2(b))의 균열 후 강성계수(α)와 항복 후 강성계수(β)를 산정하기 위한 전단항복점에서의 할선강성비는 실험적으로 초기탄성강성의 0.16로, 전단항복후의 강성은 초기탄성강성의 0.001로 가정[8]하였다.

보, 기둥, 전단벽의 전단변형을 표현하기 위한 이력곡선(hysteresis rule)은 origin-oriented 모델을 갖도록 균열강도 및 항복강도를 가정하였고 보, 기둥, 전단벽의 휨변형을 표현하기 위해 수정 Clough 모델 이력곡선을 갖도록 제반계수 값을 설정하였다.



(a) 이선형 곡선



(b) 삼선형 곡선

그림 2 비선형 해석용 골격곡선

3.4 부재의 단면내력

비선형 해석에 필요한 부재의 휨 균열강도와 전단 균열강도, 휨 항복강도와 전단 항복강도, 그리고 압축강도 등은 실제의 부재단면을 고려하여 산정한 값을 사용하였다. 보, 기둥, 전단벽의 휨 균열강도 및 휨 항복강도는 철근콘크리트 부재의 휨이론을 적용하여 계산하였고, 보, 기둥, 전단벽의 전단 균열강도 및 전단 항복강도는 일본건축학회 강도산정식[9]을 사용하였다.

3.5 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 부재의 항복힌지 발생과정과 전체 구조물의 층항복 상태를 정밀히 추적할 수 있는 한 방법이며, 지진이 발생할 경우 극한상태에 도달할 수 있는 임계부재를 확인할 수 있다. 이 방법은 실제 비선형 동적해석법을 적절하게 단순화한 것으로 구조물의 성능을 알 수 있는 반면, 고정된 수평하중의 분포 방법에 대한 타당성이 의문시되는 단점을 갖고 있다. 작용수평하중 분포방법은 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 modal adaptive distribution(MAD)[10] 방법을 사용하였으며 MAD 방법에 의한 작용수평하중은 식 (1)과 같다.

$$F_i = \frac{M_i\left[\sum_{j=1}^{m}(\Phi_{ij}\Gamma_j)^2\right]^{1/2}}{\sum_{l=1}^{n} M_l\left[\sum_{j=1}^{m}(\Phi_{lj}\Gamma_j)^2\right]^{1/2}} V,\ \Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i\Phi_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} M_i\Phi_{ij}^2} \qquad (1)$$

여기서,

n : 층수

m : 모드

Φ_{ij} : i층의 j차 모드형상

Γ_j : j차 모드에 대한 모드참여계수

M_i : i층의 질량

V : 밑면전단력

해석시 수평하중의 작용방향은 X-방향(그림 1)으로 독립되게 작용시켰으며, 비선형 해석에서 하중 증분은 각 층의 강성변화가 급격히 일어나지 않도록 수평력의 크기 단계별로 증분량을 조절하면서 증가시켰다.

3.6 비선형 동적해석

비선형 동적해석에서 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmark β법(β=0.25, γ=0.5)을 사용하였다. 비선형 동적해석에서 구조부재의 강성변화에 의한 불균형 복원력이 발생할 경우 반복계산을 수행하여 부재 항복강도의 0.01배 이하의 허용치 이내에 수렴하도록 하였다. 비선형 동적해석에서 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하였고, 입력지진동은 X-방향으로 작용시켜 해석을 수행하였다. Rayleigh 감쇠를 구하는 식은 식 (2)~(4)와 같고 감쇠계수 α, β를 구

하기 위해 가정된 감쇠비(ζ)는 5%로 하였다.

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \tag{2}$$

여기서, [C], [M], [K]는 각각 감쇠, 질량, 강성 매트릭스를 나타낸다. n차 모드에 대한 감쇠비는 다음과 같다.

$$\zeta_n=\frac{\alpha}{2}\frac{1}{\omega_n}+\frac{\beta}{2}\omega_n \tag{3}$$

i차와 j차 모드에 대한 감쇠비가 동일한, 즉 $\zeta=\zeta_i=\zeta_j$인 경우 다음과 같이 감쇠상수 α와 β를 구할 수 있다.

$$\alpha=\zeta\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i+\omega_j} \tag{4}$$

$$\beta=\zeta\frac{2}{\omega_i+\omega_j} \tag{5}$$

비선형 시간이력해석에 사용될 입력지진동은 시간이력해석에 널리 사용되고 있는 El Centro 1940 NS를 선택하였다. 지진동의 입력 최대가속도는 등가정적지진하중 산정식을 참고하여 55gal, 330gal로 설정하였다. 입력시간은 0초에서 20초까지로 하였으며, 해석시 입력된 지진이력데이터의 시간 구간은 0.02sec, 적분 시간 간격은 0.01sec를 사용하였으며, 강성변화와 속도의 방향이 변하는 곳에서는 반복 계산을 수행하였다.

4. 해석결과 및 고찰

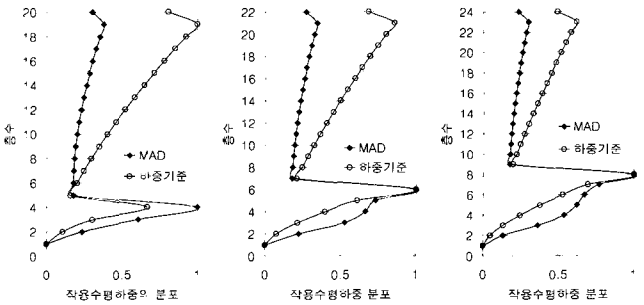
4.1 탄성해석결과 및 작용수평하중 분포

해석모델에 대한 MIDAS와 CANNY에 의한 X-방향에 대한 고유주기와 MIDAS에 의한 모드참여계수율을 표 5에 나타내었다. 하부구조의 층수가 증가할 때 3차 모드의 모드참여계수율이 증가하였으며, 이것은 하부구조의 층수가 증가할수록 고차모드의 영향이 증대되는 것으로 사료된다.

표 5 탄성해석 결과

모델	모드	고유주기		오차율 (%)	모드참여계수율 (MIDAS)
		MIDAS	CANNY		
ML1	1st	1.58	1.58	0.0	0.573
	2nd	0.63	0.63	0.0	0.339
	3rd	0.24	0.26	-7.7	0.088
ML2	1st	1.98	1.98	0.0	0.568
	2nd	0.89	0.91	-2.2	0.253
	3rd	0.32	0.32	0.0	0.179
ML3	1st	2.40	2.40	0.0	0.587
	2nd	1.09	1.10	-0.9	0.223
	3rd	0.48	0.45	6.7	0.190

여기서, 오차율(%) $=\frac{\text{MIDAS}-\text{CANNY}}{\text{CANNY}}\times 100$이며, 모드참여계수율은 각 모드에 대하여 $\Gamma_j \,/\, \sum_{i=1}^{3}\Gamma_i$의 식으로 구하였다.



(a) 모델 ML1 (b) 모델 ML2 (c) 모델 ML3

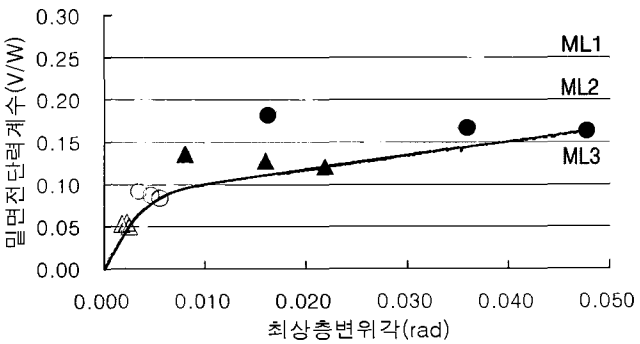
그림 3 하중분배방법에 따른 작용수평하중 분포

그림 3은 작용수평하중 분포를 하중기준[1]에 의한 등가정적지진하중의 층지진하중 분포와 고차모드의 영향을 고려한 MAD에 의한 분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼 두 가지 방법에 따른 작용수평하중 분포는 상이하며, 복합구조물과 같이 비정형성이 강한 구조물의 경우 고차모드의 영향이 구조물의 응답특성에 영향을 줄 수 있으므로, 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 MAD 방법을 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4.2 비선형 정적해석

4.2.1 최상층변위각과 밑면전단력계수

해석모델에 대하여 비선형 정적해석을 수행한 결과, 모델의 전체 높이에 대한 최상층의 변위 비인 최상층변위각과 밑면전단력계수 관계를 나타내면 그림 4와 같다. 그림의 △, ○, ▲, ●는 각 모델에 대하여 하중기준[1]에 의한 설계용 밑면전단력(V)을 기준으로 각각 V, 2V, 3V, 4V의 크기일 때의 결과들이다. 그림 4로부터 하부구조의 층수증가로 인해 밑면전단력계수는 줄어드는 반면 최상층변위각은 증가함을 알 수 있다. 이것은 하부구조의 층수가 증가함에 따라 구조물의 총중량(W)과 설계용 밑면전단력(V)은 증가하나, 하부구조의 층수 증가에 따른 주기의 증가로 인해 동적계수(C)가 감소되어, 설계용 밑면전단력의 증가율이 구조물의 총중량의 증가율보다 작으므로 구조물의 밑면전단력계수(V/W)는 하부구조의 층수가 증가할 경우 감소하였다. 또한 하부구조의 층수 증가가 전단벽에 비해 강성이 낮은 골조구조의 층간변위를 증가시켜 최상층변위각이 증가한 것으로 사료된다.



(V : 설계용 밑면전단력, W : 구조물의 총중량)

그림 4 최상층변위각-밑면전단력계수

4.2.2 층간변위각

그림 5~7과 표 6~7은 최상층 변위각 1/200에 대한 결과들로써 최상층 변위각은 모델의 최상층 높이에 대한 최상층의 변위 비를 나타낸다. 이러한 변위각은 국내 하중기준[1]에서 규정하고 있는 허용층간변위인 식 (6)을 참고하였으며, 식 (6)을 구조물의 비선형 거동을 고려한 층간변위각으로 표현하면 허용층간변위각은 1/200이 된다.

$$\Delta_a = 0.015 h_{sx} \geq R(\delta_x - \delta_{x-1}) \quad (6)$$

여기서,

Δ_a : 허용층간변위

h_{sx} : x층의 층고

R : 반응수정계수

δ_x와 δ_{x-1} : x층과 그 아래층의 층변위

하부구조의 층수는 모델에 따라 가변적이고 상부구조의 층수는 16층으로 동일하므로, 그림 5~10의 층수 표기에 있어 상부구조의 층수는 모든 모델의 전이층을 1층으로 하여 16층으로 동일하게 표현하였고, 하부구조의 층수는 모델에 따라 가변적이므로 전이층을 중심으로 하부로 갈수록 감소하는 것으로 표현하였다. 표 6과 8의 하부구조 층수는 실제 층수로 표현하였다.

그림 5는 각 모델의 층간변위각 분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 모델 ML1에서 모델 ML3로 하부구조의 층수가 증가할수록 하부구조의 층간변위각은 하부구조 높이의 중앙부 근처에서 집중적인 증가현상을 나타내며 반면에 상부구조의 층간변위각은 전반적으로 감소함을 확인할 수 있다. 이것은 전단벽으로 이루어진 높은 강성의 상부구조에 비해 상대적으로 낮은 강성을 갖는 골조구조의 층수 증가가 하부구조의 변형을 집중시키고 반면에 상부구조의 변형을 오히려 줄여주는 것으로 나타났다.

4.2.3 소성율

비선형 해석시 구조 부재의 상태를 검토하는 변수의 한 가지인 소성율은 그 값이 1이상이면 소성(항복)상태, 1이하이면 탄성상태를 나타낸다.

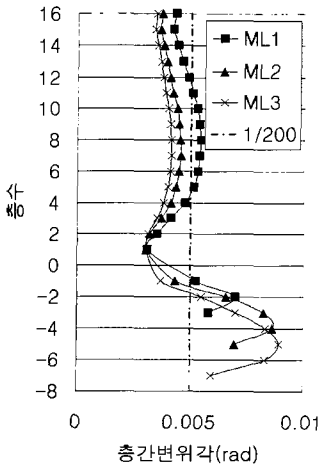


그림 5 층간변위각

표 6~7과 그림 6~7은 하부구조의 층수변화에 따라 발생하는 부재의 휨소성율을 나타낸 것이다. 표 6은 하부구조에 위치하는 보 G2(X2-X7, Y3)에 대한 양단부 휨소성율로써 하부구조의 층수가 증가할수록 보의 우단부 최대 휨소성율(ML1; 7.17, ML2; 4.19, ML3; 2.42)은 감소하였다. 표 7은 전이층 하부 기둥 주두부와 1층 기둥 주각부의 휨소성율로써 보의 경우와 같이 하부구조의 층수가 증가할수록 기둥의 휨소성율이 작아졌다. 표 6에서 하부구조 보의 우단부 휨소성율이 크게 나타난 것은 작용수평하중의 가력 방향(그림 1의 X방향)의 영향으로 사료된다. 하부구조의 층수가 증가할 경우 하부구조 보와 기둥의 단부 휨소성율이 감소하는 것은 모델 ML1에서 모델 ML3로 하부구조의 층수가 증가할 때 탄성설계시 하부구조 보와 기둥의 철근량이 증가되었고, 작용수평하중의 분배에 있어 최대 작용수평하중이 전이층에서 발생되고 하부구조 층수증가로 인해 하부구조의 인접 층의 상호간 하중분배 차이(그림 3)가 작아졌기 때문으로 사료된다.

그림 6~7은 상부구조의 연결보(B4)의 우단부와 전단벽(W9~W11)의 하단부에 대한 휨소성율 분포로써 하부구조의 층수가 증가할 경우 상부구조의 보와 전단벽의 휨소성율은 감소되는 것을 알 수 있다. 상부구조의 연결보와 전단벽에 대한 철근 배근량이 모든 모델에서 동일하므로 모델에 대한 철근 배근의 영향은 없으며 하부구조의 층수증가로 인해 상부구조 부재의 휨소성율을 감소시키는 것으로 사료된다. 그림 6으로부터 연결보 B4(coupling beam)는 수평하중에 대해 매우 취약한 부재임을 확인할 수 있다. 전단벽의 경우 전단벽의 위치에 따라 휨에 의한 소성율 분포가 상이한 것을 알 수 있다. 즉, 전단벽 W9(그림 7(a))는 모든 모델의 중간층에서 소성상태가 나타났으며, 전단벽 W10(그림 7(b))과 W11(그림 7(c))은 전이층 상부의 전단벽 최하단부에서 소성변형이 집중되었다. 이와 같이 벽체 휨소성율의 분포가 상이한 것은 벽체와 직교하는 Y 방향 벽체의 영향으로 사료된다. 그림 1에서 Y3열의 W9 벽체는 Y방향 벽 W1이 인장측

표 6 Y3열 보 G2(X2-X7, Y3, 하부골조)의 양단부 휨소성율

ML1			ML2			ML3		
층수	좌단	우단	층수	좌단	우단	층수	좌단	우단
3F	3.56	1.24	5F	1.00	0.95	7F	0.43	0.70
						6F	0.77	0.93
			4F	1.91	1.28	5F	0.98	1.25
2F	0.46	7.17	3F	0.61	4.19	4F	0.67	2.38
						3F	0.68	2.42
			2F	0.55	3.80	2F	0.59	2.04

표 7 기둥 C3(X7, Y3)의 휨소성율

위치	ML1	ML2	ML3
전이층 하부기둥 주두부	5.63	2.53	1.93
1층 기둥 주각부	6.09	4.93	4.85

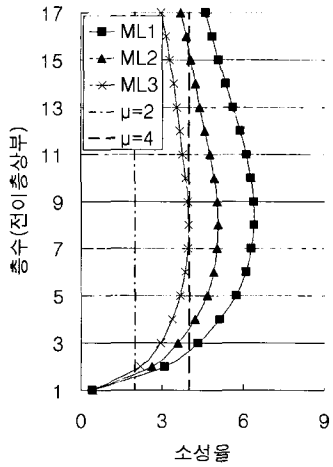
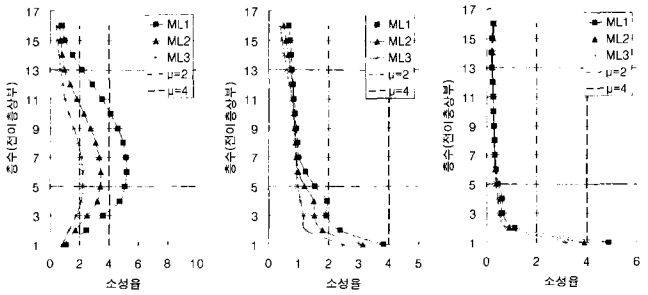


그림 6 Y3열 보 B4(상부구조)의 우단부 휨소성율



(a) W9 (b) W10 (c) W11

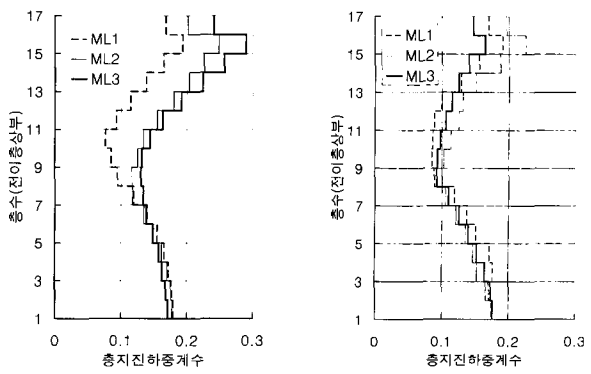
그림 7 Y3열 벽의 하단부 휨소성율

에 붙어 있으며, 벽 W11은 Y방향 벽 W2가 압축측에 붙어 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 벽 W9는 벽체 최하단부에서 인장철근의 항복이 발생하지 않은 상태이고, 벽 W11은 최하단부에서 인장철근의 항복이 선행했기 때문이다.

4.3 비선형 동적해석

4.3.1 최대 층지진하중

그림 8은 하부구조의 층수변화와 입력 지진동의 크기에 따른 상부구조의 층지진하중 분포 특성을 살펴보고자 상부구조의 최대 층지진하중을 전체 구조물의 최대 층지진하중 값에 대한 계수로 정규화(normalize)하여 표현한 것이다. 최대 층지진하중은 55gal과 330gal의 두 가지 지진동에 대해 입력 시간동안 발생된 최대와 최소 층지진하중에 절대값을 취한 값 중 큰 값이다. 여기서, 55gal은 작은 지진동으로 대부분의 부재가 탄성상태라 할 수 있으며, 330gal은 강한 지진동으로 구조물의 보와 기둥 등에서 상당한 소성힌지가 발생되었을 경우이다. 그림에서 55gal의 작은 지진동에서는 구조체가 탄성상태를 유지하기 때문에 하부구조의 층수 증가에 따라 상부층의 층지진하중계수의 분포가 증가하는데 비하여, 330gal의 강한 지진동에서는 층지진하중계수의 분포는 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 탄성범위에서는 하부구조의 층수변화가 상부구조의 층지진하중계수 증가를 그대로 반영하고 있지만, 소성변형 상태에서는 하부층에 항복이 발생하여 상부층의 층지진하중계수 값은 감소되는 현상을 나



(a) 55gal (b) 330gal

그림 8 상부구조에 대한 최대 층지진하중계수

타낸다. 이것은 하부구조의 층수가 증가할수록 상부구조에 작용하는 층전단력의 크기를 감소시킬 수 있으며, 하부구조에서 변형능력을 충분히 확보할 수 있는 설계가 이루어지면 상부구조의 설계는 단순해지고 부재단면을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

4.3.2 소성율

표 8~9는 지진동의 입력시간 동안 하부구조에 위치하는 보 G2(X2-X7, Y3)의 양단부와 기둥 C3(X7, Y3)에 대해 전이층 하부기둥 주두부와 1층 기둥 주각부에서 발생된 최대 휨소성율을 나타낸 것이다. 표 8~9로부터 하부구조의 층수가 증가할수록 하부구조의 보와 기둥의 단부 최대 휨소성율은 감소하였다.

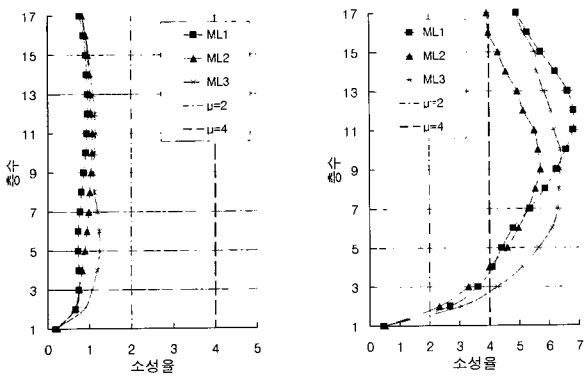
그림 9~10은 상부구조의 연결보 B4의 우단부와 전단벽

표 8 Y3열 보 G2(X2-X7, Y3, 하부구조)의 양단부 최대 휨소성율

구분	ML1			ML2			ML3		
	층수	좌단	우단	층수	좌단	우단	층수	좌단	우단
55gal	3F	0.37	0.38	5F	0.31	0.41	7F	0.32	0.31
				4F	0.33	0.45	6F	0.35	0.33
							5F	0.36	0.34
	2F	1.45	1.49	3F	0.68	0.91	4F	0.51	0.48
				2F	0.63	0.79	3F	0.51	0.46
							2F	0.45	0.42
330gal	3F	2.29	1.39	5F	0.82	0.79	7F	0.74	0.60
				4F	1.00	0.93	6F	0.91	0.78
							5F	0.99	0.90
	2F	4.85	5.96	3F	3.53	2.84	4F	1.80	1.38
				2F	3.27	2.53	3F	1.69	1.15
							2F	1.39	0.86

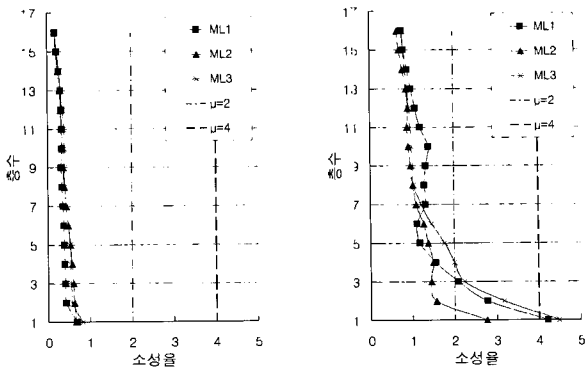
표 9 기둥 C3(X7, Y3)의 최대 휨소성율

구분		ML1	ML2	ML3
전이층 하부기둥 주두부	55gal	0.45	0.48	0.45
	330gal	3.56	1.72	1.04
1층 기둥 주각부	55gal	0.28	0.32	0.26
	330gal	4.34	3.31	2.96



(a) 55gal (b) 330gal

그림 9 Y3열 보 B4(상부구조)의 우단부 휨소성율



(a) 55gal (b) 330gal

그림 10 Y3열 벽 W10의 하단부 휨소성율

의 하단부에 대한 휨소성율 분포로써 하부구조의 층수가 증가할수록 비선형 정적해석 결과(그림 6, 그림 7(b))에서와 같이 상부구조의 보와 벽체 휨소성율이 감소하지는 않고 하부구조의 층수변화에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다. 이것은 해석모델에 따라 건물의 동적성질이 변화하고, 또한 입력지진동에 의한 건물의 동적응답에 기여하는 파괴력의 강도가 달라지기 때문으로 볼 수 있다.

5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 상부벽식-하부골조 구조의 복합구조물에 전이층이 전이보(transfer girder) 형식인 모델을 선정한 후, 모델의 하부구조 층수를 변화시키면서 3차원 복합구조물의 비선형 해석을 수행하여 응답특성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비선형 정적해석의 최상층변위각과 밑면전단력계수로부터 하부구조의 층수가 증가할 경우 구조물의 밑면전단력계수는 감소하였으나 최상층변위각은 증가하였다.
2) 비선형 정적해석 결과 하부구조의 층수가 증가할 경우 상부벽식 구조의 층간변위각과 소성율은 감소하였으며, 상부벽식은 탄성상태에 가까운 거동을 하였다.
3) 비선형 정적해석 결과 하부구조의 층수가 증가할 경우 하부구조의 층간변위각이 집중적으로 증가하지만, 하부구조 부재인 기둥과 보의 철근량을 증가시켜 하부구조의 소성율은 감소되며 하부구조에 상당한 연성을 확보할 수 있었다.
4) 비선형 동적해석 결과 하부구조의 층수가 증가할수록 상부구조의 최대 층지진하중분포는 다소 감소하는 경향을 보인다.

하부구조의 층수가 증가할 경우 상부구조는 상대적으로 강성이 높아 탄성상태를 유지하고 하부구조에 변형이 집중되므로, 추후에는 상부구조를 하나의 질점계로 단순화시킨 모델화의 방법을 제안하여, 그 타당성을 검토하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부로 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다. 과제번호: 2000-1-31000-007-3

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, 2000, p. 345.
2. 노희일 외 4인, "복합구조물의 응답해석을 위한 해석모델설정에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 2000. 4, pp. 273-278.
3. 박기수, 김희철, "상부벽식-하부골조를 가진 복합구조물 고유주기 산정에 관한 연구", 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 1999. 9, pp. 1-13.
4. MIDAS IT, *MIDAS/GENw Ver. 4.3.2. User's Manual Vol. I*, MIDAS IT Co., Ltd., 2000.
5. Li, K. N., *CANNY 99, 3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Users Manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p. 215.
6. Li, K. N., *CANNY 99, 3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Technical Manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p. 183.
7. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준·해설, 기문당, 2000, p. 413.
8. Otani, S. and Matsumori, T., "Correlation of damage and analysis: experience from the 1995 Kobe earthquake," *Proceedings of 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Seoul, Korea, 1997. 8, pp. 841-856.
9. 日本建築學會, 鐵筋コンクリート造建物の靭性保證型耐震設計指針(案)·同解說, 東京, 1997.
10. Valles, R., Reinhorn, A., Kunnath, S., La, C., and Madan, A., "IDARC 2D version 4.0: A program for the inelastic damage analysis of buildings," *NCEER-96-0010*, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1996, p. 237.