

복합구조물의 상부층수 변화에 따른 탄소성 정적 및 동적 응답특성

The Response Characteristics of Push-over and Nonlinear Time History Analysis with Variations in the Upper Stories of the Mixed Building Structure

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

국문요약

상부벽식-하부골조구조(복합구조)는 상·하부 구조물의 서로 다른 구조형식으로 인해 전이층 부근에서 질량 및 강성의 큰 차이를 보인다. 이러한 복합구조의 특징은 일반적으로 강성, 질량 및 기하학적 수직 비정형성을 갖게 된다. 본 연구에서는 복합구조물의 상부층수가 변화하는 네 가지 해석모델을 선정하여 탄소성 정적 및 동적 해석을 수행하고 해석결과를 통해 구조물의 탄소성 응답특성을 살펴보고자 한다. 본 연구의 결론은 다음과 같다. 1) 탄소성 정적해석에서는 하부골조 구조의 보와 기둥의 항복힌지가 상부벽식구조의 층수 변화에 상관없이 전 모델에 걸쳐 비슷한 크기의 설계용 밀면전단력에서 항복이 발생되었고 그 분포 또한 비슷하였다. 그러나 상부벽식구조의 경우 전단벽이 고층화될수록 coupling beam에서 설계용 밀면전단력 V에 대해서도 휨항복힌지가 발생되었다. 2) 탄소성 동적해석으로부터는 하부골조의 일부층의 보는 55gal의 작은 지진동에서 소성이 발생되었고 상부벽식구조의 경우 coupling beam과 전이층 상부의 전단벽에서 소성변형이 집중되었다. 3) 탄소성 해석으로부터 상부벽식구조의 층수가 낮아질수록 하부골조구조의 층강성이 상대적으로 줄어들게 되어 하부골조에서 연약층(soft story) 현상이 나타났다.

주요어 : 복합구조물, 탄소성 정적해석, 탄소성 동적해석, 항복힌지, 소성율

ABSTRACT

The mass and stiffness of upper wall-lower frame system(mixed building structures) change sharply at transfer floor due to different structural system in upper and lower part. These mixed building structures generally show the stiffness, weight or geometric vertical irregularities. The purpose of this study is to investigate the response characteristics of these structures by push-over analysis and nonlinear time history analysis. For four types of analysed models, only the variation of upper wall stories was considered. The conclusions of this study are following: (1) In the push-over analysis, yielding hinges in beams and columns of lower frame occurred at the base shear of similar magnitude in all models. But as the number of stories of upper wall increases, yielding hinges at ends of coupling beams were observed in the small magnitude of base shear. (2) In the nonlinear time history analysis, yielding of lower frame occurred at beams with as small ground acceleration as 55gal, and in upper walls yielding was concentrated on coupling beams and shear walls near the transfer floor. (3) As the number of stories of upper walls decreases, the story stiffness of the lower frames decreased relatively and the occurrence of soft stories in the lower frame was observed.

Key words : mixed building structure, push-over analysis, nonlinear time history analysis, yielding hinge, ductility ratio

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지금까지 건설되어진 복합구조물(상부벽식+하부골조)의 구조적 특징을 살펴보면, 전이층을 중심으로 상부는 주거공간의 벽식구조이며 하부는 상업공간의 골조구조로 이루어진 경우가 많이 나타나고 있다. 이와 같이 서로 다른 두 가지의 구조형식을 하나의 구조체로 건설하게 되면 setback이 생기거나, 상·하부의 구조가 정확하게 맞물려 연결되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이러한 상·하부의 구조형식은 전이층을 두어 연결시킬 수 있으며, 전이층의 형식으로는 transfer girder, transfer truss 및 transfer slab 등이 있다. 복합구조

물에서 전단벽으로 이루어진 상부 벽식구조는 전단벽의 면내강성이 매우 높아 수직 캔틸레버와 같이 휨변형을 주로 하고, 하부 골조구조는 슬래브의 강막작용(rigid diaphragm)으로 전단변형이 지배적이다. 이러한 변형양상이 서로 다른 두 구조형식이 전이층을 중심으로 상·하부에 연결되어 하나의 구조물이 되고 또한 상·하부 구조형식에 따른 층강성, 층질량 등의 차이와 기하학적인 setback 등으로 인해 구조물의 탄소성 거동을 예측하기란 쉽지 않다. 복합구조물과 같이 전이층을 중심으로 상·하부의 구조형식이 서로 다른 경우 그 구조적 성능에 대한 명확한 이해와 검증이 부족하며, 이로 인해 해석 및 설계가 관계적인 방법에 따라 행해져서 결과에 대한 신뢰부족으로 과다 설계가 될 수도 있다.

철근콘크리트 벽식구조나 골조구조의 탄소성 거동에 대한 연구는 여러 연구자들^{(1),(2)}에 의해 이루어지고 있으나, 복합구조물과 같이 강한 비정형성을 갖는 구조물에 대한 지금까지의 연구는 여러 가지 제약으로 인해 대부분 탄성상태에 대한 결과를 고찰하는 연구들이며⁽³⁾, 탄소성 정적 및 동적해

* 정회원 · 거창전문대학 건축과 조교수, 박사수료

** 정회원 · 동서대학교 건설공학부 조교수, 공학박사
(대표저자 : jdh@gdsu.dongseo.ac.kr)

*** 동아대학교 건축학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 8. 3 / 심사종료일 : 2001. 9. 12)

석을 통한 구조물의 응답특성을 고찰하는 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 구조물의 응답에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 변수 중 상부벽식구조의 층수가 변화하는 모델에 대해 탄소성 정적 및 동적해석을 수행하고자 한다. 수행결과로부터 항복хин지 분포와 발생위치, 소성을 및 변위분포 등을 분석하여 상부벽식 구조의 층수변화가 상부벽식구조와 하부골조구조의 탄소성 응답특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

탄소성 해석은 구조물의 능력설계(capacity design)⁽⁴⁾에 이용되고, 이 해석을 통해 구조물의 손상, 소성거동 및 항복 상태를 예측할 수 있다. 본 연구에서 정적해석으로는 탄소성 정적해석(push-over analysis)을 사용하였고, 동적해석으로는 탄소성 시간이력해석(nonlinear time history analysis)을 사용하였다. 탄소성 정적해석의 경우 작용하중을 점점 증가시켜 밀면전단력의 크기가 설계용 밀면전단력의 1배, 2배, 3배, 4배일 때의 결과를 분석하고, 탄소성 동적해석의 경우 입력 지진동을 기준으로 최대지반가속도 값의 크기를 55gal, 110gal, 220gal, 330gal로 변화시켜 그 결과를 분석하였다.

복합구조물의 부재설계를 위해서 탄성해석용 상용프로그램인 MIDAS/GENw Ver.4.2.2(MIDAS)⁽⁵⁾을 사용하였으며, 탄소성 정적 및 동적 해석을 하기 위한 프로그램으로는 3차원 입체 탄소성해석용으로 개발된 범용해석 프로그램 CANNY 99^{(6),(7)}를 사용하였다.

상부벽식구조의 층수변화에 따른 모델에 대해 탄소성 정적 및 동적 해석에서 얻어진 결과를 바탕으로 다음과 같은 사항들을 고찰하였다.

- 1) 탄소성 정적해석에서는 최상층변형각과 밀면전단력계수 관계, 층간변위와 층전단력 관계, 항복хин지 발생 순서 및 위치 등에 따른 응답특성
- 2) 탄소성 동적해석에서는 부재의 소성을, 최대층간변위와 최대 층변위 등의 응답특성

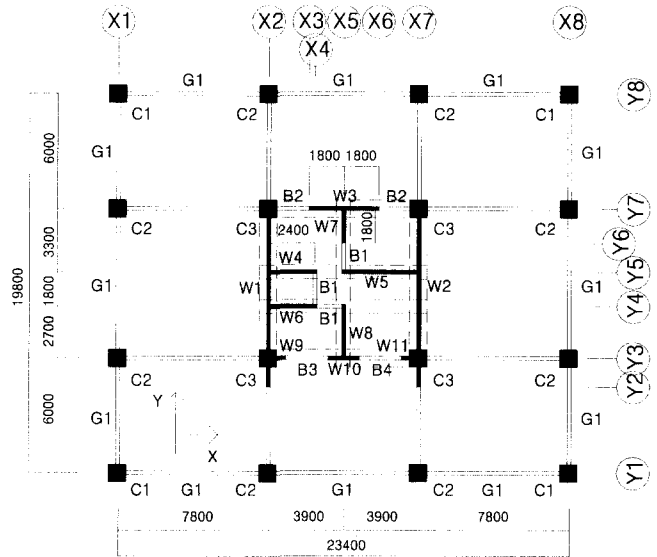
2. 탄성 해석 및 설계

2.1 해석모델

본 연구에 사용될 해석모델은 표 1과 같이 4가지로서 모든 모델의 평면은 그림 1과 같이 동일하며, 단지 상부벽식구조의 층수만 달리한다. 해석모델은 계산량과 계산의 복잡함을 줄이고자 실제복합구조를 간략하게 이상화시킨 가상모델로서 상부벽식구조는 1세대, 하부골조구조는 3스팬이다. 모든 모델의 하부골조의 층고는 4.5m, 상부벽식의 층고는 2.8m로 하였다. 모델의 전이층 형식은 transfer girder(TG1)를 사용하였으며, TG1은 그림에서 점선으로 표시하였다. 상부벽식의 평면형태는 국내에서 건설된 아파트 평면형태를 참조하였으며, TG1은 상부 전단벽이 위치하는 곳에 두어 상부하중을

표 1 해석모델

모델	하부골조층수	상부벽식층수	전체층수	전체높이(m)
MU1	3	21	24	72.3
MU2	3	16	19	58.3
MU3	3	11	14	44.3
MU4	3	6	9	30.3



* TG1 : Pit층의 모든 transfer girder, G2 : 하부골조의 표기없는 모든 보
그림 1 해석모델의 평면도

하부골조의 기둥에 전달하게 하였다. 그리고 하부골조는 상부벽식구조의 평면길이를 고려하여 그림과 같이 보와 기둥을 위치시켰다.

2.2 설계하중

구조물의 탄성해석 및 단면설계를 위한 하중들 중에서 초기 부재단면설계를 위하여 고정하중, 적재하중, 등가정적지진하중이 적용되었으며, 예제 구조물의 단면설계용 하중조합은 대한건축학회 제정의 하중기준⁽¹¹⁾을 따랐다.

(1) 고정하중 및 적재하중

중력하중 중 고정하중과 적재하중 각각에 대하여, 상부벽식은 5.88kPa과 1.96kPa, 하부골조는 5.49kPa과 3.43kPa을 고려하였다.

(2) 등가정적지진하중

등가정적지진하중을 산정하기 위한 설계용 밀면전단력 산정식은 식 (1)과 같다.

$$V = \left(\frac{A I_E C}{R} \right) W \tag{1}$$

여기서,

V : 설계용 밀면전단력

A : 지역계수

I_E : 중요도계수
 C : 동적계수
 R : 반응수정계수
 W : 건축물의 전중량

본 연구에서는 지역계수(A) 0.11, 중요도계수(I_E) 1.5, 동적계수를 구하기 위한 지반계수(S) 1.0, 기본진동주기는 기타 구조의 진동주기 산정식을 사용하였으며, 반응수정계수(R) 3.0으로 하여 해석을 수행하였다.

표 2~4는 위와 같은 하중조건으로 탄성 설계된 모델의 부재치수와 배근을 나타낸 것이다. 표 4에서 저층 모델의 벽체 배근량은 최소 철근비에 의해 대부분 배근 되었다. 사용재료의 특성은 철근의 경우, 탄성계수 $E_s=205940.0\text{MPa}$, 항복응력은 D16 이상에서는 $f_y=392.0\text{MPa}$, D13 이하에서는 $f_y=294.0\text{MPa}$ 이다. 콘크리트의 경우, 탄성계수 $E_c=22751.0\text{MPa}$, 설계기준 강도 $f_{ck}=23.5\text{MPa}$ 이다.

표 2 보 배근 리스트

Model	Gir. ID	Story No.	Size (mm)	Main bars		Stirrups	
				End	Cent.	End	Cent.
MU1 ~ MU4	G1	2F~3F	400×600	6-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
				2-HD22	3-HD22		
MU1 ~ MU4	G2	2F~3F	400×600	8-HD25	2-HD25	D10@200	D10@250
				2-HD25	3-HD22		
MU1	TG1	4F	700×2100	13-HD32		HD19@200, HD25@200'	
MU2		4F	700×2100	11-HD29		HD19@200, HD19@200'	
MU3		4F	700×2100	13-HD22		HD19@200, HD16@200'	
MU4		4F	700×2100	12-HD22		HD19@200, HD16@200'	
상부 벽식 보부재(진 모델)	B1	5F~RF	180×580	4-HD16		D10@200	
				4-HD16			
	B2	5F~RF	180×1300	4-HD16		D10@200	
				4-HD16			
B3	5F~RF	180×1000	4-HD16		D10@200		
			4-HD16				
B4	5F~RF	180×320	4-HD16		D10@200		
			4-HD16				

* 수평전단보강근

표 3 기둥배근 리스트

Model	Col. ID	Story No.	Size(mm)	Main bars	Ties
MU1	C1, C2	1F~3F	600×600	14-HD22	D10@200
	C3	1F~3F	1000×1000	52-HD25	D10@200
MU2~MU4	C1, C2	1F~3F	600×600	12-HD22	D10@200
	C3	1F~3F	1000×1000	32-HD25	D10@200

표 4 벽배근 리스트

Model	Wall ID	Thk. (mm)	Story No.	Ver. bars*	Hor. bars*	Edge bars	
MU1	W1, W2	200	4F~8F	D13@150	D10@300	4-HD16	
			9F~14F	D13@300	D10@300	4-HD16	
			15F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W3	180	4F~8F	D13@200	D10@300	4-HD16	
			9F~14F	D13@400	D10@300	4-HD16	
			15F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W4, W6	180	4F~8F	D16@150	D10@300	4-HD16	
			9F~14F	D10@300	D10@300	4-HD16	
			15F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W5, W8	180	4F~8F	D16@100	D13@150	4-HD16	
			9F~14F	D13@300	D10@300	4-HD16	
			15F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W7	180	4F~8F	D13@150	D10@300	4-HD16	
			9F~14F	D13@300	D10@300	4-HD16	
			15F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
MU2	W1, W2	200	4F~7F	D13@200	D10@200	4-HD16	
			7F~12F	D10@200	D10@200	4-HD16	
			13F~RF	D10@400	D10@400	4-HD16	
	W3	180	4F~7F	D13@200	D10@300	4-HD16	
			7F~12F	D13@400	D10@300	4-HD16	
			13F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W4, W6, W8	180	4F~7F	D16@150	D10@150	4-HD16	
			7F~12F	D10@400	D10@300	4-HD16	
			13F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W5	180	4F~7F	D16@100	D13@150	4-HD16	
			7F~12F	D13@200	D10@300	4-HD16	
			13F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W7	180	4F~7F	D13@400	D10@300	4-HD16	
			7F~12F	D10@400	D10@300	4-HD16	
			13F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
MU3	W1, W2	200	4F~6F	D10@300	D10@200	4-HD16	
			7F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W3, W7, W8	180	4F~6F	D10@300	D10@200	4-HD16	
			7F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W4, W6	180	4F~6F	D13@150	D10@300	4-HD16	
			7F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
	W5	180	4F~6F	D16@150	D10@200	4-HD16	
			7F~RF	D10@300	D10@300	4-HD16	
	MU4	W1, W2	200	4F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16
				W3, W7, W8	4F~RF	D10@400	D10@300
		W4, W6	180	4F~5F	D13@200	D10@300	4-HD16
				6F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16
W5		180	4F~5F	D13@150	D10@200	4-HD16	
			6F~RF	D10@400	D10@300	4-HD16	
MU1 ~ MU4	W9~W11	180	4F~RF	D13@300	D10@300	4-HD16	

* 복배근

3. 탄소성 해석

3.1 기본 가정

건물의 탄소성응답을 파악하기 위하여 부재모델을 이용한 입체해석모델을 사용하였으며, 구조물은 기초 위에 고정되어 있고, 각 층의 바닥은 강막작용을 하는 것으로 가정하며, P- Δ 효과를 고려하였다. 보-기둥 접합부는 강체로 가정하고 요소 단부는 강역으로 표현하였다.

3.2 요소모델 성격^{(6),(7)}

3.2.1 보, 기둥의 모델화

탄소성 해석을 위해 사용된 보, 기둥의 모델화 방법은 그림 2와 같이 부재 단부에 두 개의 휨스프링, 부재 중앙부의 전단과 축스프링에 의해 탄소성 일축스프링으로 이상화하였다. 이러한 탄소성 일축스프링 요소는 다른 변위 요소에 대한 상호관계 없이 이상화되는 것이다. 보의 축변형은 고려되지 않았으며, 기둥의 축변형은 탄성변형으로 고려하였다. 전이층을 구성하는 transfer girder의 경우 춤이 깊은 보이므로 평면응력 요소를 이용한 정밀해석이 요구되지만, 본 논문의 목적이 수평하중에 의한 탄소성 응답특성을 고찰하는 것이므로, 본 논문에서는 transfer girder를 휨강성이 높은 강체보로 가정하여 일반 보와 같은 보 요소모델로 모델링하였고, 부재의 단면내력도 일반 보와 같은 강도산정식^{(8),(9)}을 사용하였다.

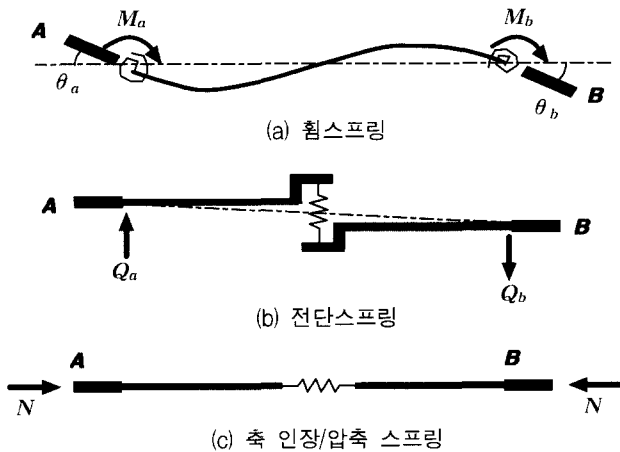


그림 2 보, 기둥의 모델화 방법

3.2.2 전단벽의 모델화

전단벽 모델은 그림 3과 같이 전단벽의 상·하부에서는 무한강성을 갖는 판넬 보(rigid panel-beam)가 위치하는 것으로 가정하며, 판넬변형을 나타내기 위해 면내 축스프링, 회전스프링, 전단스프링이 사용되었다. 면외강성은 무시하였다.

3.3 골격곡선 및 이력곡선

골격곡선(skeleton curve)은 구조부재를 일방향으로 정적

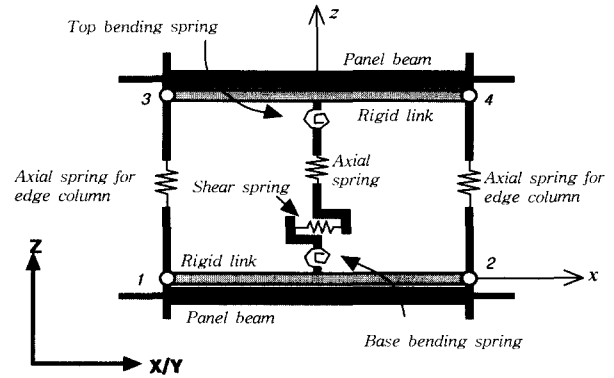
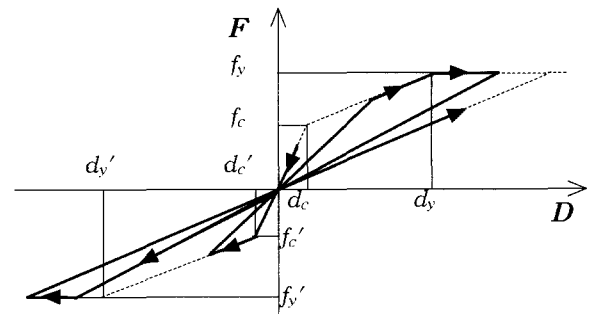


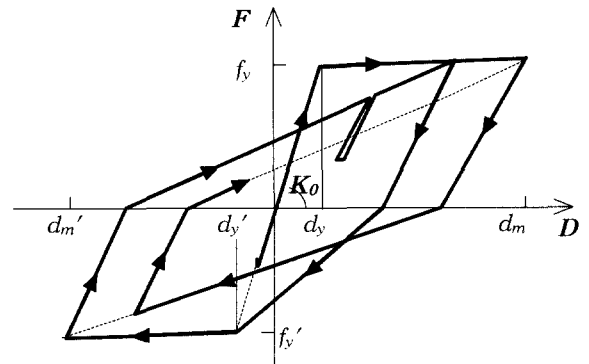
그림 3 전단벽의 모델화 방법

증분하여 가력할 때 얻어지는 힘-변형 관계를 나타내는 곡선으로 이 곡선은 부재를 정(+), 부(-)방향으로 반복 가력시 얻어지는 이력곡선을 결정하고 부재강도 및 변형의 경계점을 결정하는 역할을 한다. 본 연구에서 사용한 골격곡선은 휨변형은 bilinear, 전단변형은 trilinear, 축변형은 elastic 모델을 사용하였다.

이력곡선(hysteresis rule)은 골격곡선을 바탕으로 구조부재를 정(+), 부(-) 방향으로 반복 가력할 때 얻어지는 힘-변형 관계를 단순하게 모델화시켜 표현하는 방법이다. 보, 기둥, 전단벽의 전단변형은 그림 4(a)와 같은 Origin-Oriented 모델 이력곡선을 갖도록 균열강도(f_c, f_c') 및 항복강도(f_y, f_y')를 가정하였다. 보, 기둥, 전단벽의 휨변형은 그림 4(b)와 같이 두 개의 직선으로 표현되는 수정 Clough 모델 이력곡선을 갖도록 제반계수값을 설정하였다.



(a) Origin-Oriented 모델



(b) 수정 Clough 모델

그림 4 탄소성해석용 이력곡선

3.4 부재의 단면내력

탄소성해석에 필요한 부재의 휨균열강도와 전단균열강도, 휨항복강도와 전단항복강도, 그리고 압축강도 등은 실제의 부재단면을 고려하여 산정한 값을 사용하였다.

보, 기둥, 전단벽의 휨강도는 철근콘크리트 부재의 휨이론을 적용하여 휨균열강도 및 휨항복강도를 계산하였다. 즉, 일정 축력을 받는 철근콘크리트 부재의 휨모멘트-곡률 관계는 변형의 평면유지 가정 및 재료의 응력-변형도 관계를 가정하여 수치적분으로 해석하였으며 기둥과 전단벽의 보유내력 산정에는 P-M 상관관계를 고려하였다. 보, 기둥, 전단벽의 전단균열강도 및 전단항복강도는 일본건축학회 강도산정식^{(8),(9)}을 사용하였다. 전단항복점에서의 활선강성비는 실험적으로 초기탄성강성의 16%로, 전단항복후의 강성은 초기탄성강성의 0.1%로 가정하였다.⁽¹⁰⁾

3.5 탄소성 정적해석

구조물의 탄소성 정적해석으로는 해석대상 구조물의 형식, 구조재료 등에 따라 여러 종류의 간이해석이 제안되어 있다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 탄소성 정적해석은 작용수평하중 분포를 고정시키고 수평하중을 점점 증가시키면서 부재의 항복상태를 파악하는 탄소성 정적해석이 부재의 항복한지 발생과정과 전체 구조물의 총항복 상태를 정밀히 추적할 수 있는 한 방법이다. 작용수평하중 분포는 식 (2)와 같은 Valles et al⁽¹²⁾에 의한 modal adaptive distribution을 X-방향(그림 1)으로 독립되게 작용시켜 해석한다.

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

여기서,

- n : 층수
- m : 모드
- Φ_{ij} : i 층의 j 차 모드형상
- Γ_j : j 차 모드에 대한 모드 참여계수
- M_i : i 층의 질량
- V : 밑면전단력

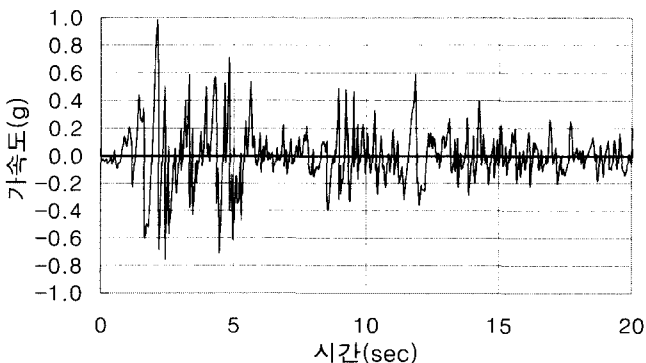


그림 5 El Centro 1940 NS 파형의 시간이력

해석에서 하중 증분은 각 층의 강성변화가 급격히 일어나지 않도록 수평력의 크기 단계별로 증분량을 조절하면서 증가시킨다. 탄소성 정적 및 동적 해석에서는 구조물의 고정하중을 초기하중으로 고려하여 부재에 재하시켰다.

3.6 탄소성 동적해석

탄소성 동적해석으로 시간이력해석이 사용되었고, 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmark β 법($\beta=0.25$, $\gamma=0.5$)을 사용하였다. 탄소성 시간이력해석에서 구조부재의 강성변화에 의한 불평형복원력이 발생할 경우 반복계산을 수행하여 부재항복강도의 0.01배 이하의 허용치 이내에 수렴하도록 하였다.

탄소성 시간이력해석시 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하였고, 입력지진동은 X-방향으로 작용시켜 탄소성해석을 수행하였다. Rayleigh 감쇠는 식 (3)과 같이 구조물의 동적해석에 사용되는 감쇠행렬 C 가 질량행렬과 강성행렬에 비례한다고 가정하는 것으로 질량과 강성에 비례하는 상수는 식 (4), (5)의 α , β 를 사용한다. 해석모델에 대해 고유치해석을 수행하여 얻어진 1차모드와 2차모드의 진동수(ω_1 , ω_2)와 가정된 감쇠비($\zeta=5\%$)를 식 (3)과 (4)에 대입하여 감쇠계수 α , β 를 구한다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (4)$$

$$\beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5)$$

탄소성 시간이력해석에 사용될 입력지진동은 시간이력해석에 널리 사용되고 있는 El Centro 1940 NS를 선택하였고 입력지진동의 시간이력파형은 그림 5와 같으며, 그림은 최대가속도 값을 1.0으로 조정된 그림이다. 또한 사용된 지진하중에 대한 응답스펙트럼은 그림 6과 같다. 지진동의 입력 최대가속도는 등가정적 지진하중 산정식 (1)을 참고하여 55gal, 110gal, 220gal, 330gal로 설정하였다. 입력시간은 0초에서 20초까지로 하였다. 이와 같이 설정한 최대지반가속도

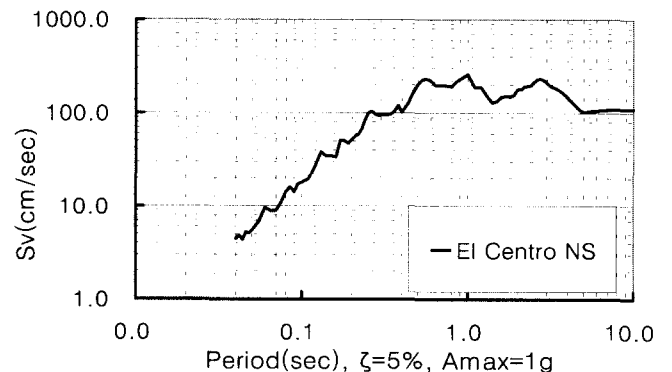


그림 6 El Centro 1940 NS의 응답스펙트럼곡선

값은 우리나라 내진설계기준의 지진구역 1에 해당하는 최대 지반가속도 ($\frac{AI_{ES}}{R}g$)에 대해 1배, 2배, 4배, 6배에 상당하는 값이 된다.

탄소성 동적해석의 입력지진동의 크기 배율과 정적해석의 설계용 밀면전단력의 크기 배율이 다르게 설정된 것은 동일한 배율 조건으로는 동적해석에서 구조물의 탄소성 거동을 파악하기 곤란하여 상향 조절되었다.

4. 해석결과 및 고찰

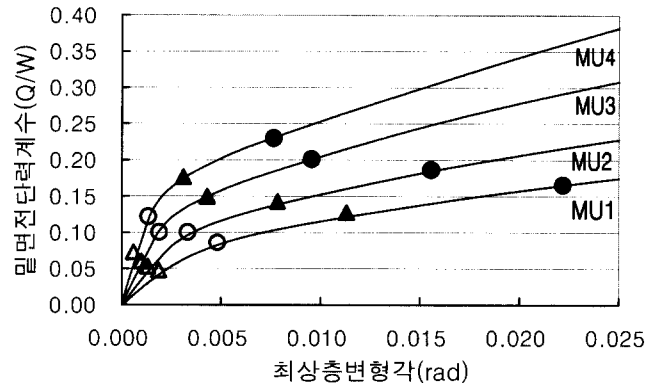
4.1 고유주기 및 고유모드

해석모델에 대한 MIDAS와 CANNY에 의한 X, Y 방향에 대한 고유주기와 MIDAS에 의한 질량참여율을 표 5에 나타내었다. 질량참여율은 고층모델로 갈수록 1차모드의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있다. 표 5에서 알 수 있듯이, 두 해석 프로그램에 의한 탄성해석 결과는 거의 일치한다. 이것은 CANNY의 해석모델링 방법이 충분한 타당성과 신뢰성이 있음을 간접적으로 보여주는 것이다.

4.2 탄소성 정적해석

4.2.1 최상층변형각과 밀면전단력계수

해석모델에 대하여 탄소성 정적해석을 수행한 결과 중, 최상층변형각-밀면전단력 관계를 나타내면 그림 7과 같으며, 그림 7~10의 △, ○, ▲, ●는 각 모델에 대하여 내진설계기준에 의한 설계용 밀면전단력(V)을 기준으로 각각 V, 2V, 3V, 4V의 크기일 때의 결과들이다. 그림 7에서 구조물의 상부층수가 감소하는데도 모델별로 밀면전단력계수의 변화가 크지 않은 것은 구조물의 층수 감소로 인한 전체중량(W)의 감소율과 진동주기의 감소로 인한 동적계수(C)의 증가율이



(Q : 밀면전단력, W : 구조물의 총중량)

그림 7 최상층변형각-밀면전단력계수

거의 일정하게 반비례하고, 상부층의 질량이 전이층과 하부층의 질량에 비해 상대적으로 작으므로 상부층의 층수변화로 인한 질량의 변화가 전체 구조물의 질량 변화에 큰 영향을 주지 못한 것으로 사료된다. 상부벽식이 저층인 복합구조물(MU3, MU4)은 설계용 밀면전단력에 비하여 구조물의 항복전단력이 매우 높은 것을 알 수 있으나 고층(MU1, MU2)으로 갈수록 밀면전단력에 대한 항복이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 이것은 고층인 모델(MU1, MU2)에서 상부벽식구조의 coupling beam 단부와 최하층 벽체 하단부에 휨항복이 집중적으로 발생하여 수평변위가 상대적으로 조기에 증가하기 때문으로 판단된다.

4.2.2 층간변위와 층전단력

그림 8은 층간변위-층전단력 관계도이다. 그림 8로부터 모든 모델이 하층부로 갈수록 층강성(=층전단력/층간변위)이 크고 층항복이 뚜렷하게 나타나지만, 고층부로 갈수록 층강성이 작고 층항복이 늦게 발생하거나 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 같은 크기의 밀면전단력에 대해 상부벽식구조의 층수가 증가할수록 하부골조구조의 층간변위는 더욱 큰 것으로 나타났다. 그림에서 상부벽식구조가 저층인 모델(MU3, MU4)에서는 상부벽식구조에서 층항복이 발생하지 않으며, 고층인 모델(MU1, MU2)에서도 벽식구조 상층부의 층항복은 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 이것은 그림 9의 항복한지 발생현황으로부터도 알 수 있듯이 상부벽식구조의 항복은 상대적으로 강성과 강도가 낮은 coupling beam에 집중되고, 벽체의 항복은 일어나지 않기 때문이다.

4.2.3 항복한지의 발생

그림 9와 10은 각 모델의 부재에 대한 항복한지 발생순서도이다. 그림에서 보는 양단부, 기둥과 전단벽은 상·하단부에서 휨과괴에 의한 항복한지를 나타내었고, 전단파괴에 의한 항복한지는 Y5 골조 중, 모델 MU1, MU2의 X5-X7의 일부 전단벽에서만 발생되었으며 그 표시는 전단벽 중앙의 우측에 나타내었다. 그림 9에서 나타난 것처럼 하부골조의 경우 설계용 밀면전단력 V일 때 2층 보의 우단부에서, 2V 및 3V일 때 1층 기둥 주각부와 3층 기둥 주두부에서 항복한지가

표 5 해석모델의 고유주기 및 질량참여율

모델	모드	MIDAS		CANNY		오차율(%)		질량참여율 누계(%, MIDAS)	
		Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty
MU1	1st	2.16	1.79	2.19	1.77	-1.36	1.06	54.30	61.81
	2nd	0.72	0.69	0.73	0.68	-1.79	1.07	90.07	92.37
	3rd	0.34	0.22	0.37	0.22	-6.92	-2.28	93.12	93.98
MU2	1st	1.55	1.30	1.57	1.28	-1.10	1.24	61.63	72.68
	2nd	0.63	0.56	0.63	0.54	0.02	3.98	90.52	91.78
	3rd	0.24	0.16	0.26	0.16	-6.89	-1.20	92.60	96.48
MU3	1st	1.09	0.98	1.10	0.98	-0.76	0.50	76.52	84.07
	2nd	0.49	0.38	0.51	0.37	-2.59	1.50	90.24	90.89
	3rd	0.16	0.15	0.16	0.15	-3.73	-1.94	94.28	90.96
MU4	1st	0.83	0.79	0.83	0.79	0.00	0.14	86.02	87.14
	2nd	0.26	0.19	0.26	0.19	-2.93	0.14	89.54	92.21
	3rd	0.14	0.13	0.14	0.13	-0.92	2.35	97.53	97.90

$$\text{오차율(\%)} = \frac{\text{MIDAS} - \text{CANNY}}{\text{CANNY}} \times 100$$

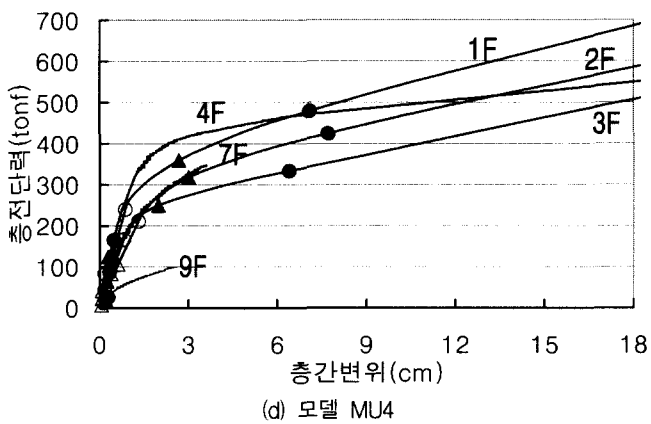
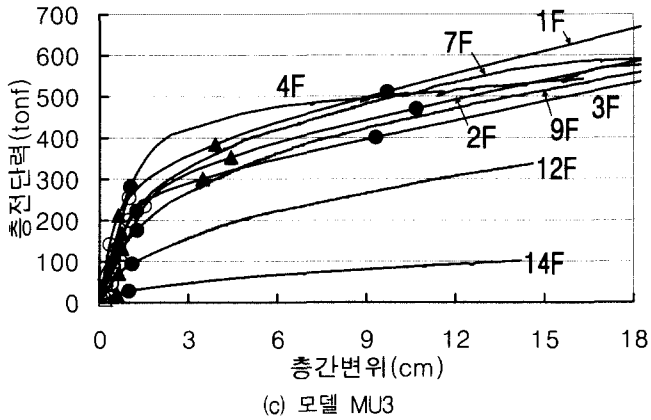
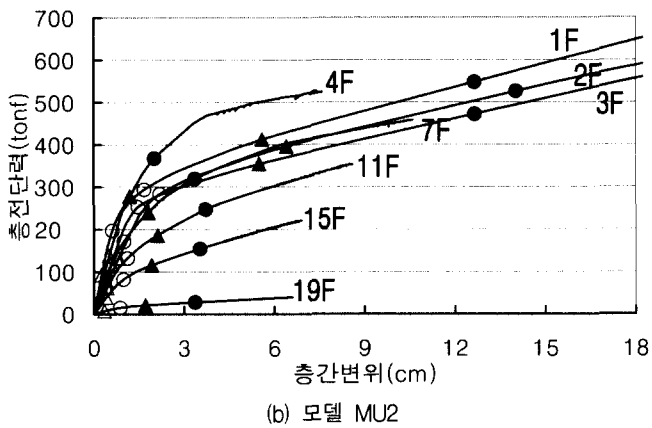
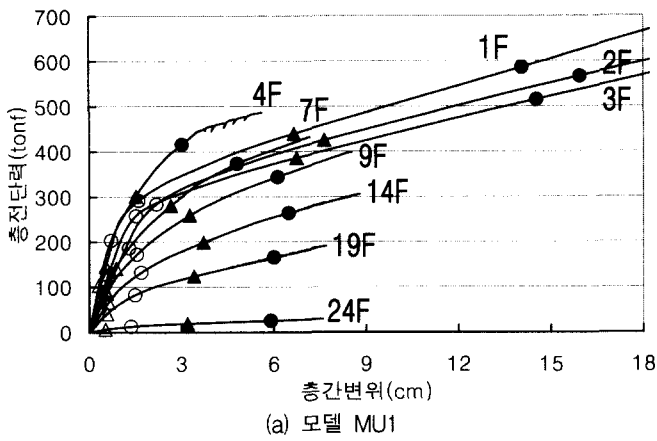


그림 8 층간변위-층전단력관계

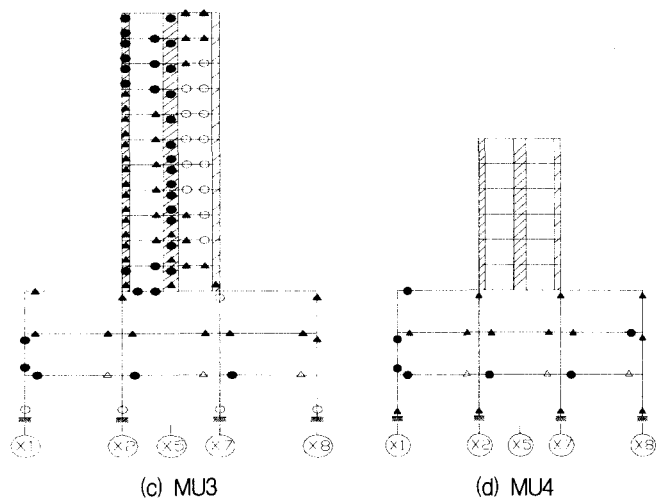
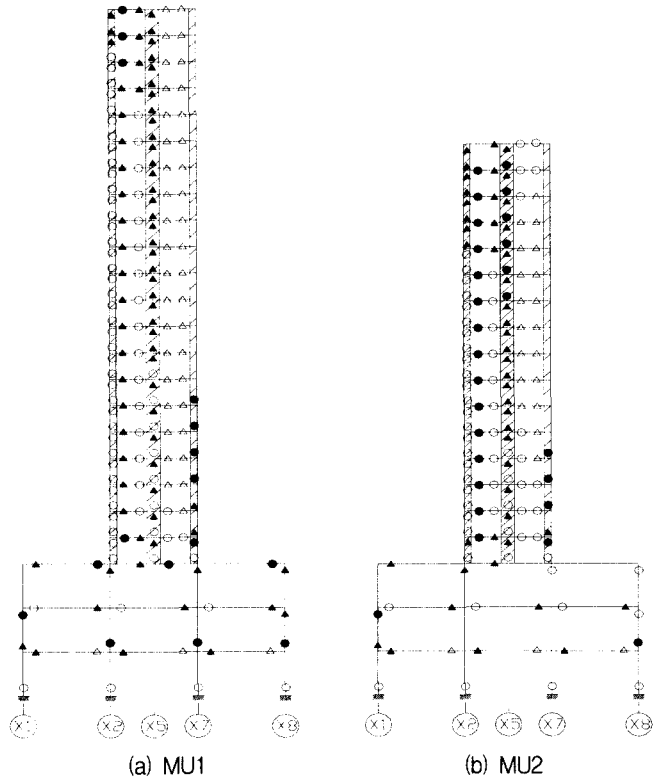


그림 9 Y3 골조의 항복хин지도

전 모델에 걸쳐 공통적으로 발생되었다. 하부골조구조의 항복хин지 발생 특징은 상부벽식구조의 층수가 증가할수록 보양단부의 항복хин지 발생은 점차 빨라지는 경향이 있으며, 기둥은 모델 MU4를 제외한 전모델의 1층 주각부와 3층 주두부에서 설계용 밀면전단력의 2V일 때 항복хин지가 형성되었다.

상부벽식구조의 경우, 모델 MU4는 탄성상태를 유지하며, 고층모델(MU1, MU2)에서는 설계용 밀면전단력 V일 때 Y3 골조 중간층의 coupling beam 단부에서 항복이 발생하여 상·하부층으로 확산되고, 2V일 때 Y3골조와 Y5골조의 전단벽의 하단부에서 항복хин지가 발생하기 시작하여 상부층으로 확산되는 경향을 보인다.

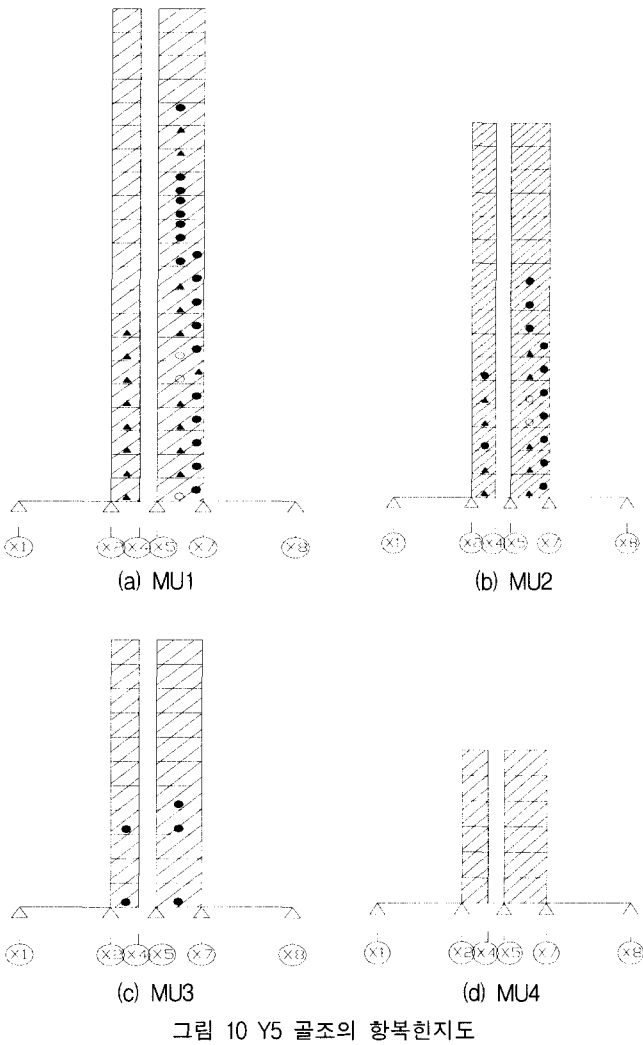


그림 10 Y5 골조의 항복한지도

4.3 탄소성 동적해석

4.3.1 소성율

탄소성해석시 구조부재의 상태를 검토하는 변수의 한 가지인 소성율(μ)은 항복변위(d_y)에 대한 최대변위(d_m)의 비율로 정의되며, 소성율이 1이상이면 소성상태, 1미만이면 탄성상태를 나타낸다.

표 6은 하부골조구조에서 대표적인 기둥의 주두부와 주각부의 휨에 대한 소성율을 나타내는 것으로 모든 해석모델이 110gal까지는 탄성상태이나 1층 기둥 주각부와 transfer girder(TG1)에 접하는 3층 기둥 주두부에서는 220gal 이상에서 소성상태가 되었다. 소성율은 모든 모델에서 3층 주두부보다 1층 주각부의 소성율이 상대적으로 크게 발생하였다. 하부골조 기둥의 소성율은 모델 MU4가 가장 큰 값을 나타내며, 동적해석은 상부층수 변화에 따른 차이는 나타나지 않았다.

표 7은 하부골조구조에서 2층과 3층의 Y3열 X2-X7보의 우단부 소성율과 그림 11과 12는 상부벽식구조에서 Y3열 보(B3, B4)의 우단부 소성율 분포를 나타낸 것이다. 먼저 하부골조구조부재인 Y3열 보의 경우 2층에 위치한 보가 3층의 보보다 큰 소성율을 나타내며, 특히 2층 보의 우단부는

표 6 C3(X2·Y3)기둥의 소성율

구분		MU1	MU2	MU3	MU4
3층 기둥 주두부	55gal	0.42	0.36	0.34	0.41
	110gal	0.67	0.58	0.66	0.72
	220gal	1.39	1.07	1.00	1.50
	330gal	3.49	2.16	1.43	3.89
1층 기둥 주각부	55gal	0.30	0.27	0.32	0.47
	110gal	0.57	0.59	0.71	0.92
	220gal	1.68	1.62	1.76	4.26
	330gal	3.69	4.27	3.25	6.88

표 7 Y3열 X2-X7보의 우단부 소성율

구분		MU1	MU2	MU3	MU4
2층, Y3열의 X2-X7보	55gal	1.64	1.46	1.41	2.23
	110gal	2.48	2.27	2.27	3.64
	220gal	3.97	3.80	3.82	5.98
	330gal	5.19	6.00	5.25	7.82
3층, Y3열의 X2-X7보	55gal	0.40	0.37	0.37	0.45
	110gal	0.50	0.47	0.49	0.64
	220gal	0.92	0.74	0.83	1.10
	330gal	2.63	1.37	1.02	1.65

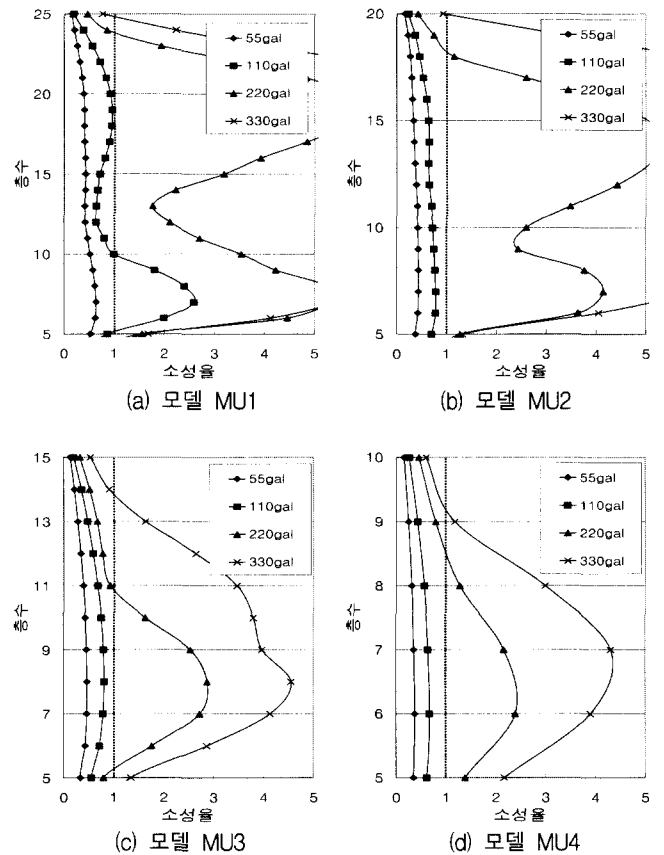


그림 11 Y3열 보B3의 우단부 소성율분포

55gal의 작은 지진력에도 소성상태가 진행되었다. 이것은 정적 비선형 해석결과와도 유사하다. 하지만 상부층수 변화에 대한 소성율 분포는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 상부

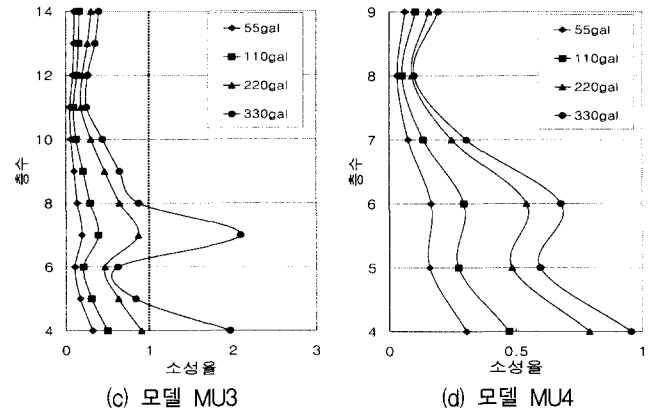
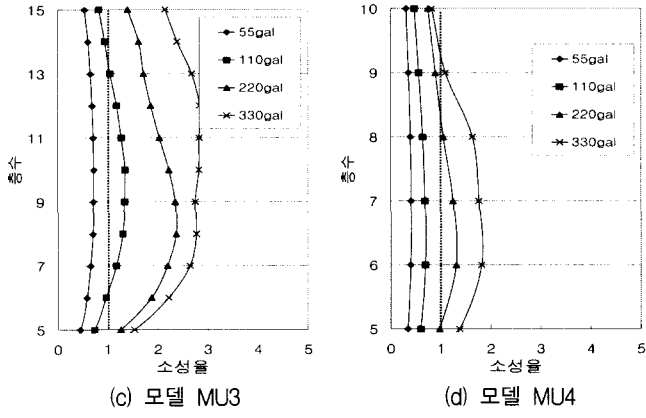
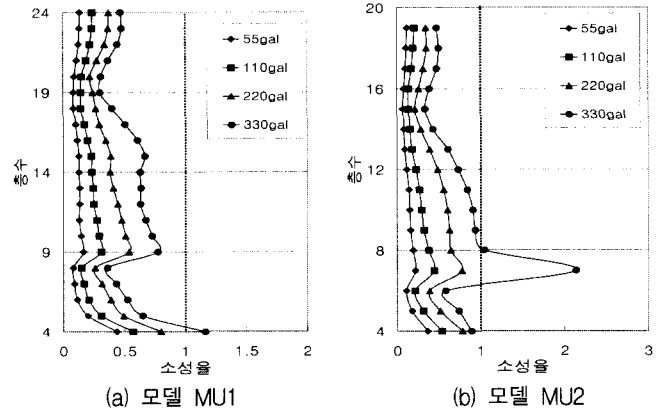
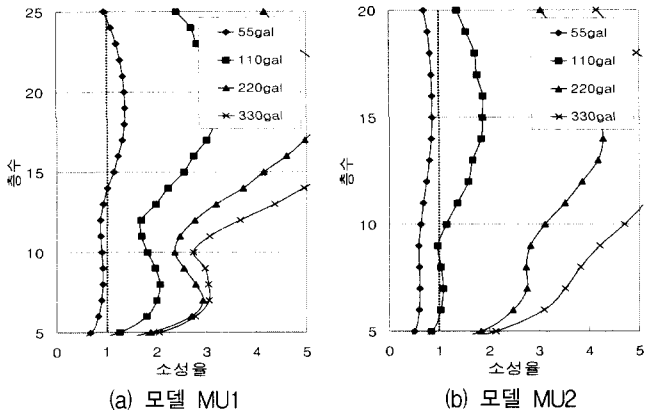


그림 12 Y3열 보B4의 우단부 소성율분포

그림 13 W4 벽 하단부의 소성율분포

벽식 구조부재인 Y3열 보의 양단부는 벽체와 연결된 고정지점으로 coupling beam에 해당되며 그림의 소성율은 coupling beam의 고정단 모멘트에 대한 것이다. 특히 그림 11과 12의 coupling beam은 상부벽식구조의 층수가 높고 지진력이 증가할수록 매우 큰 소성율을 나타낼 수 있다. 이것은 상부벽식구조의 층수가 증가함에 따라 coupling beam에 변형이 집중되는 것을 나타낸다.

그림 13은 상부벽식구조의 전단벽 중에서 W4 벽의 하단부 소성율 분포를 나타낸 것으로 대부분의 전단벽은 탄성범위에 있으나, 입력지진동의 크기 330gal에서 모델 MU1 및 MU3의 5층 벽의 하단부와 모델 MU2와 MU3의 철근 배근이 변화하는 층에서 일부 소성변형이 발생되었다. 모델 MU3가 다른 모델에 비해 큰 소성율이 나오는 것은 모델의 고유주기(1.09sec)와 입력지진동에 포함된 탁월주기 특성이 일치하기 때문인 것으로 사료된다.

상부벽식구조의 층수를 변화시킨 모델들에 대하여 입력지진동의 크기를 변화시켜 탄소성 동적해석을 수행하여 소성율 분포 양상을 분석하여 보면, 상부벽식구조의 경우 최저층의 벽체 하단부에서 휨소성이 일부 나타나기는 하나 대부분의 전단벽은 330gal까지 탄성상태이다. 하부골조의 경우 기둥은 110gal까지는 탄성상태를 유지하지만, 220gal부터는 소성상태임을 알 수 있다. 그리고 보의 경우 2층 보는 55gal의 낮은 지진력에서 휨소성이 발생하기 시작하여 330gal의 지진력의 크기에서는 3층의 모든 보에서 소성이 발생하였

다. 탄소성 정적해석의 항복한지 발생과 탄소성 동적해석의 소성한지 발생의 양상은 비슷하다.

4.3.2 변위

그림 14와 15는 각각 최대층간변위와 최대층변위를 나타낸 것으로 최대층간변위를 국내기준의 층간변위 제한치인 0.015h(h는 층고)와 비교해 보았다. 최대입력지진동인 330gal까지 모든 해석모델의 층간변위는 국내의 제한치의 값을 모두 만족하였다.

상부벽식구조의 층수가 변화함에 따른 전체적인 최대층간변위 및 최대층변위 양상을 살펴보면, 상부벽식구조의 경우 상부층수가 높을수록 변위가 증가한다. 이것은 상부층수가 높은 모델에서는 coupling beam과 최하층 전단벽의 하단부가 소성변형을 일으키기 때문이다. 반면, 하부골조의 경우 상부층의 층수 변화에 상관없이 거의 비슷한 변위 값을 나타낸다. 이것으로부터 하부골조구조의 변위는 상부벽식구조의 층수에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

그림 14로부터 상부벽식구조의 층수가 낮은 모델일수록 상부층의 층간변위가 줄어들고, 상대적으로 하부골조의 변위가 증가하는 연약층(soft story) 현상이 두드러지게 나타난다. 이것은 상부벽식구조의 층수가 낮을수록 하부구조에 비하여 상부구조의 층강성이 상대적으로 높기 때문으로 사료된다.

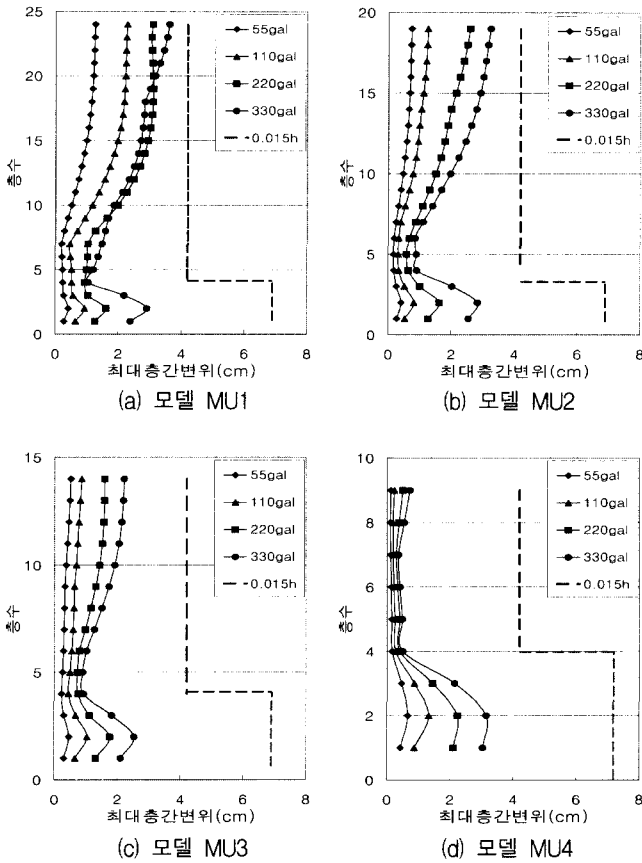


그림 14 최대층간변위

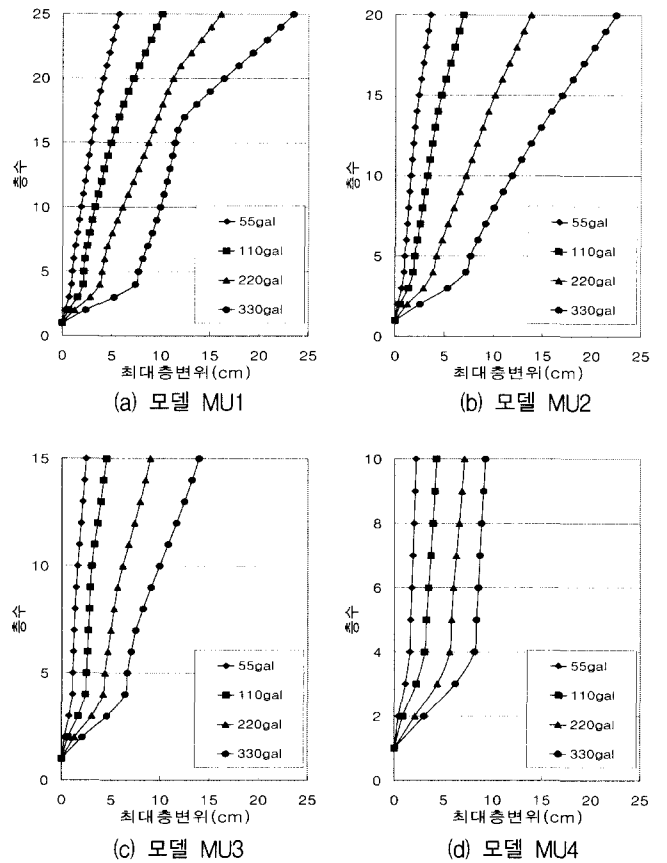


그림 15 최대층변위

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 주상복합구조물의 구조형식중 상부벽식-하부골조에 전이층이 transfer girder 형식인 모델을 선정 한 후, 모델의 탄소성 정적 및 동적 거동 특성을 살펴보기 위해 상부벽식구조의 층수를 변화시키면서 3차원 탄소성해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄소성 정적해석으로부터 하부골조구조의 보와 기둥은 상부벽식구조의 층수 변화에 상관없이 전 모델에 걸쳐 비슷한 크기의 설계용 밀면전단력에서 휨항복이 발생되었고 그 발생 위치도 유사하다. 그러나 상부벽식구조가 고층화될수록 설계용 밀면전단력 V일 때 상부벽식구조의 coupling beam에서 휨항복현지가 발생되었다.
- 2) 탄소성 동적해석으로부터 하부골조의 일부층의 보는 55gal의 작은 지진동에서 소성이 발생되었고 지반에 고정된 기둥 주각부와 전이층에 연결된 하부층의 기둥 주두부에서는 220gal의 입력지진동 크기에서 소성이 발생되었다. 상부벽식구조의 경우 coupling beam과 전이층 상부의 전단벽에서 소성변형이 집중되었다.
- 3) 복합구조물의 탄소성 정적 및 동적응답특성으로부터 하부골조의 항복현지 발생 및 층간변위는 상부벽식구조의 층수 변화의 영향을 거의 받지 않는다. 반면에 상부벽식

구조에서는 상부층수가 낮아질수록 상부벽식구조의 소성 변형은 발생되지 않으며, 상부벽식구조의 층수가 낮아질수록 하부골조구조의 층강성이 상대적으로 낮아져 하부골조에서 연약층(soft story) 현상이 나타난다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호 : 2000-1-31000-007-3

참 고 문 헌

1. 배익주, "정적·동적 비선형 해석에 의한 철근콘크리트 이중골조의 내진성능 검토", 석사학위논문, 동아대학교, 2000. 2, p. 57.
2. 강호근, "철근콘크리트 벽식 구조물의 정적 및 동적 탄소성 거동에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교, 1999. 2, p. 157.
3. 이한선 외, "복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구", 건설교통부 98 연구개발사업보고서, R&D/98-0003, 고려대학교, 1999, 12, p. 366.
4. 한국지진공학회, "내진설계기준연구(II)-내진성능향상", 건설교통부, 1997, p. 493.
5. "MIDAS/GENw Ver. 4.2.2. User's Manual, Vol. I", 포스코 개발주식회사, 2000.

6. Li, K. N., *CANNY 99, 3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Users Manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p. 215.
7. Li, K. N., *CANNY 99, 3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Technical Manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p. 183.
8. “中高層壁式鐵筋콘크리트造設計施工指針・同解説”, 日本建築センター, 2000.
9. “鐵筋콘크리트造建物の靱性保證型耐震設計指針(案)・同解説”, 日本建築學會, 1997.
10. 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.
11. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, 서울, 2000, p. 345.
12. 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.