

철근콘크리트구조물의 상사법칙에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Similitude Requirements of Reinforced Concrete Structures

정 란* 박현수** 김정섭***
Chung, Lan Park, Hyun Soo Kim, Jeong Seob

요 약

정적하중은 동적하중에 비해 재하속도가 느리므로 보다 합리적인 내진설계 기준 제정을 위해서는 정적실험과 별도로 동적실험이 필요하다. 그러나 구조물의 실물 크기로 동적실험을 수행하기에는 여러가지 기계적, 경제적인 제약이 있으므로 그 크기를 축소시킨 모형실험이 일반적으로 수행되고 있다.

이 연구에서는 11개의 철근 콘크리트 보-기둥 집합부 실험체에 대해 이미 잘 알려진 상사법칙을 적용하여 길이 축척비 1 : 2 : 4로 제작하여, 재하진동수를 0.0025Hz~2.0Hz로 각각 서로 다르게 작용시켜 철근 콘크리트 부재의 동적 모형실험에 대한 신뢰성을 검토하였다.

실험결과, 상사법칙에 의해 설계된 모형실험체는 원형크기 실험체의 동적거동 예측에 유용하게 사용될 수 있음이 확인되었다.

Abstract

It is well known that the behavior of R/C members under static cyclic loading is somewhat different from that under dynamic cyclic loading, such as earthquake loading, because static loading rate is substantially lower than that corresponding to the frequencies of seismic excitation.

The purpose of this research is to establish the reliance for modeling techniques of small-scale specimens subjected to dynamic cyclic loading.

This research focused on the similitude requirements for reinforced concrete frame structures subjected to dynamic cyclic loading. Length scale ratio of specimens were 1 : 2 : 4, and eleven specimens were tested at the frequencies of 0.0025Hz~2.0Hz.

It was confirmed that modeling techniques based on the similitude requirements were useful methods to evaluate the behavior of full-size R/C structures subjected to earthquake type loading.

Keywords : Behavior of R/C structure, static cyclic loading, dynamic cyclic loading, full-scale prototype, small-scale modeling techniques, frequency, similitude law.

* 정회원, 단국대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

** 정회원, 단국대학교 건축공학과 강사, 공학박사

*** 정회원, 조선대학교 건축공학과 부교수

• 이 연구는 1993년 학술진흥재단 지방대 육성과제 지원으로 연구되었음.

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 1995년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

지진과 같은 빠른 진동수의 하중(1.0~10.0Hz 이하 동적하중이라 한다.)을 받는 철근 콘크리트 구조물의 거동을 예측하는 데 있어 기존의 많은 연구들이 실제 지진상황의 동적하중 상태보다는 정적하중 상태에서 이루어진 실험결과에 주로 의존하고 있다. 특히 동적하중 효과에 관한 연구는 국내에서는 아직까지 드물며 선진외국에서도 일부 연구자들이 진동대를 사용한 몇가지 연구결과를 제외하고 대부분 주로 단순히 가해지는 반복하중을 dynamic loading rate가 아닌 quasi-static loading rate로 실험하였다. 이러한 정적하중 상태는 실제의 지진이나 바람에 의한 하중 상태보다는 훨씬 재하속도가 늦으므로, 지진이나 바람과 같은 동적하중이 작용하면 실험적으로 예측했던 결과와 서로 다를 수 있을 것이다. 실제로 충격하중이나 폭발하중이 구조물에 작용하면 휨과괴 모드로 설계된 부재라도 전단파괴의 양상을 보인다는 것을 기존 연구문헌[1,2,7,8]에도 보고되었다. 또한 1995년 1월에 발생한 일본 관서지방 대지진에서도 이러한 흔적을 찾아볼 수 있다.

따라서 지진하중을 받는 구조물의 거동을 보다 더 정확하게 예측하기 위해서는 정적하중 실험결과만을 가지고 분석하는 것 보다는 동적하중 실험결과에 근거하여 거동을 분석하는 것이 보다 더 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 구조물의 크기가 큰 건축 및 토목구조물 시험체를 실물 크기로 제작하여 동적실험을 수행하는 것은 여러가지 경제적, 기계적 제약으로 인해 큰 어려움이 있다.

이 연구에서는 실물 크기의 실험체와 축소된 모형실험체의 정적 및 동적하중 실험결과를 분석하므로써 모형 실험의 신뢰성을 높이고 나아가 정적하중 실험결과와 동적하중 실험결과를 비교, 검토함으로써 궁극적으로는 정적하중 모형실험결과를 가지고 동적하중 실물 크기 실험결과를 예측할 수 있는 기초 자료를 수집하는 데 연구의 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 시험체 설계

시험체는 모멘트 연성골조 가운데 외층부의 보-기둥 접합부를 3가지 크기로 모형화하였다. 11개의 보-기둥 접합부 시험체에 정적 및 동적반복하중을 각각 작용시켜 재하속도에 의한 영향과 시험체 크기 및 철근의 배근 상태를 변수로 하였다.

시험체는 「강한 기둥-약한 보」의 설계개념[3, 4,7]에 의한 접합부 파괴 및 보의 파괴, 기둥의 파괴를 고려하여 기둥과 보의 휨 강성비를 1.5이상으로 하여 가능한 실제 조건에 근접하도록 설계하였다.

실험의 주요한 변수는 다음과 같다.

2.1.1 시험체 크기

이 연구의 시험체 길이 축척계수는 1:2:4이며, 작은 모형(S형) 시험체의 보의 단면은 5×7.5cm, 기둥단면은 7.5×7.5cm, 중간 모형(M형) 시험체는 S형 시험체 크기의 2배로 보단면은 10×15cm, 기둥단면은 15×15cm이다.

또 실물 크기(L형) 시험체 보단면은 20×30cm, 기둥단면은 30×30cm로 거의 실물 크기 시험체에 가깝게 제작하였다. 상세한 시험체 설계는 표 1과 같고 L형 시험체의 치수는 그림 1과 같다.

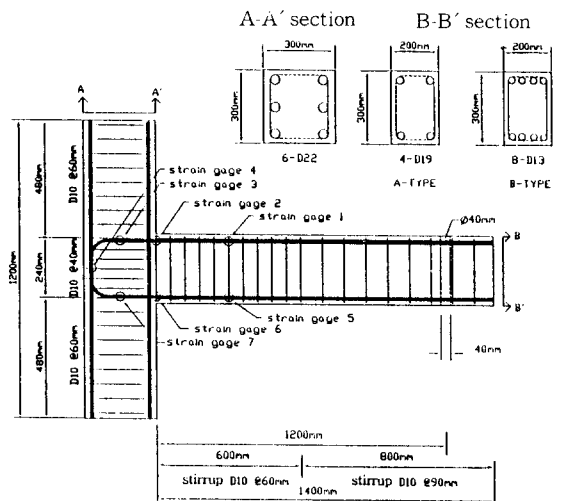

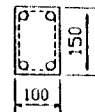
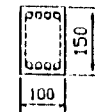
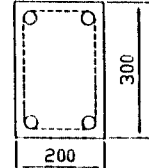
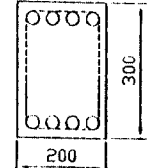

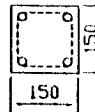
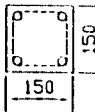
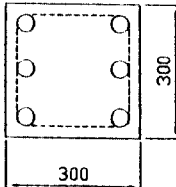
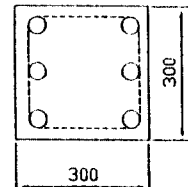


Fig.1 Large-scale Specimens design details

Table 1 Beam-column Specimen design

TYPE	Type S	Type M _A	Type M _B	Type L _A	Type L _B
Specimen	S 1,S 2,S 3	M 1,M 2,M 3	M-4,M 5,M 6	L 1,L 2,L 3	L 4,L 5,L 6
Beam					
Main Steel	4 D2.5(0.64cm ²)	4 D10(2.84cm ²)	8 D6(2.56cm ²)	4 D19(11.48cm ²)	8 D13(10.16cm ²)
Sub Steel	D1(0.053cm ²)	D6(0.32cm ²)	D6(0.32cm ²)	D10(0.71cm ²)	D10(0.71cm ²)
Column					
Main Steel	4 D6(1.28cm ²)	4 D13(5.08cm ²)	4 D13(5.08cm ²)	6 D22(23.22cm ²)	6 D22(23.22cm ²)
Sub Steel	D1(0.053cm ²)	D6(0.32cm ²)	D6(0.32cm ²)	D10(0.71cm ²)	D10(0.71cm ²)
No. of Specimens	3	3	3	3	3

2.1.2 주근의 직경

보단면에서 철근단면적이 거의 같을 경우 작은 직경의 철근을 여러 가닥 사용한 보가 큰 직경의 철근을 배근한 보보다 철근의 부착성능이 더 우수하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 철근의 부착강도는 철근 콘크리트 구조물에서 에너지 흡수능력에 크게 영향을 미치는 것으로 철근의 부착강도는 기존 연구에서 밝혀진 바대로[2,7,8] 재하속도에 민감하며 부착강도가 커지면 응력집중 현상을 나타낸다.

따라서, 같은 철근량을 배근하더라도 작은 단면적을 가진 철근을 배근할 경우 보-기둥 접합부에 동적하중에 의한 응력 집중현상을 완화시킬 수 있고 취성적인 파괴를 피할 수 있는지를 검토하기 위해 M형 시험체와 L형 시험체 보에 철근의 배근을 A-TYPE(주근수 2개)과 B-TYPE(주근수 4개)으로 구분하여 배근하였다.

2.1.3 재하속도

동적하중에 대한 구조물의 거동과 정적하중을

작용시킨 구조물의 거동과의 차이를 비교하기 위해 시험체에 재하진동수 0.0025~0.005Hz의 정적하중과, 1.0~2.0Hz의 동적하중을 각각 작용시켰다.

2.2 사용재료의 특성

이 실험에 사용된 철근과 콘크리트의 재료적 특성은 다음과 같다.

2.2.1 철근

보-기둥 접합부에 사용된 주근 및 보강근은 S형 시험체의 경우 특별히 주문 제작된 D1과 D2.5의 철근이 사용되었다. M형 시험체에 사용된 철근은 실제 현장에서 사용되는 철근으로 보의 주근을 A-type 시험체는 D10을, B-type 시험체는 D6을 사용하였고 전단보강 철근은 모두 D6 철근을 사용하였다. L형 시험체의 경우 보의 주근인 경우 D19와 D13을 전단보강 철근은 D10을 각각 사용하

Table 2 Characteristics of reinforcement for specimens

TYPE	bar (No.)	area (cm ²)	yield strength (t/cm ²)	tensile strength (t/cm ²)	elastic modulus (t/cm ²)	yield strength (×10 ⁻³)	note
TYPE-S	D1	0.053	2.8				stirrup of beam
	D2.5	0.16	5.9	6.8	2025	3.2	main-steel of beam
	D6	0.317	4.7				main-steel of column
TYPE-M	D10	0.713	3.9	5.29	2004	2.0	main-steel of beam(A-type)
	D6	0.317	3.48	4.82	1970	1.8	main-steel of beam(B-type)
	D13	1.267	3.95	6.38	2050	1.9	main-steel of column
TYPE-L	D19	2.865	3.32	4.77	2000	1.7	main-steel of beam(A-type)
	D10	0.713	3.99	5.29	2004	2.0	stirrup of beam
	D13	1.267	3.95	6.38	2050	1.9	main-steel of beam(B-type)
	D22	3.871	3.91	5.85			main-steel of column

였다.

시험체에 사용된 철근의 인장실험 결과는 다음 표 2와 같다.

2.2.2 콘크리트

콘크리트의 배합은 요구되는 강도에 따라 설계 되었으며, S형과 M형 시험체는 마이크로 콘크리트로 제작하였다. 각 시험체에 3개씩 실린더를 동시에 제작하여 28일동안 같은 조건으로 양생한 후 시험체와 같은 날 압축실험을 하여 강도를 측정 한 결과 S형 시험체는 평균 260kg/cm², M형 시험체는 260 kg/cm², L형 시험체는 210kg/cm²으로 각각 나타났다.

2.3 시험체의 제작

시험체는 거푸집을 방수 합판으로 제작하고 철근을 먼저 엮어 넣은 다음 콘크리트를 넣어 제작하였다. S형 시험체는 직경 0.81mm인 이형표면 철사를, M형 시험체는 D6 철근을, L형 시험체는 D10의 철근을 각각 전단보강 철근으로 사용하여 보의 주철근과 함께 엮었으며, 이 주철근을 거푸집 양끝에 고정시킴으로써 피복두께를 S형 시험체는 0.75cm, M형 시험체는 1.5cm, L형 시험체는 3cm를 정확하게 유지시켰다.

시험체는 콘크리트를 부어넣고 진동기를 사용하여 충분히 다졌으며, 실린더와 함께 온도 15℃ 이상 유지하면서 28일 양생한 후 실험하였다.

2.4 실험장치 및 측정방법

이 연구의 목적에 알맞은 실험을 위하여 한국기계연구소 구조 실험실 내의 MTS 시스템을 임차하여 실험하였다. 실험체 설치 상황은 그림 2에서 보는 바와 같이 시험을 위해 기둥 부분을 수평으로 눕혀서 기둥 양단부에서 수평축 회전이 가능하도록 4개의 힌지를 이용하여 고정시켰다.

기둥의 축력도입을 위해서 actuator를 이용, 기둥 한쪽 단부에 긴결시켜 기둥의 평형하중의 약 35% 정도인 대략 40kg/cm²의 압축력을 작용시켰다. 보의 반복하중은 반력벽에 부착된 용량 10ton인 actuator를 켈틸레버 보 끝부분에 연결시켜 가력하였으며 가력점도 회전을 고려하여 힌지로 처리하였다.

실험은 MTS closed-loop testing system에 의해 수행되었는데 실험에 사용한 actuator의 최대

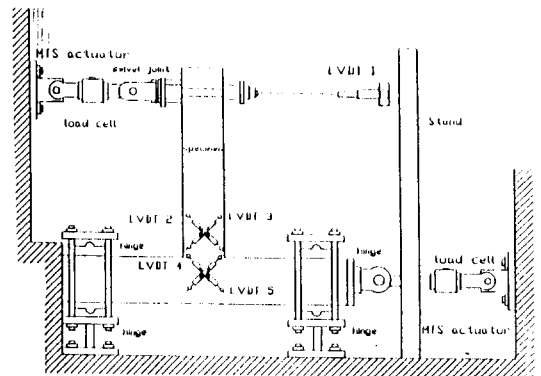


Fig.2 Test set-up

하중은 10ton, 최대 가동변위 10cm 이다. 시험체에 그림 1과 같이 7개의 변형계이저를 보의 주근에 부착하여 각 하중상태에서의 변형도 값을 측정하였으며, 또한 5개의 LVDT를 설치하여 보의 처짐과 회전 변형을 측정하였다(그림 2 참조). 시험체에 가해진 하중, 변위와 변형도 값을 알기 위해 12개 채널의 자료수집장치(데이터 수집 진동수 250Hz)가 설치되었다.

2.5 실험방법

11개의 실험체 중에 6개는 0.0025~0.005Hz 정도의 정적하중으로 나머지 5개는 1.0~2.0Hz 정도의 동적하중으로 시험체에 작용시켰으며, 시험체에 작용한 변위이력은 그림 3과 같다. 이 그림에서 연성비는 변위 값을 보의 주 철근이 최초로 항복했을 때의 변위로 나눈 값이다. 각 시험체에 가해진 가력 진동수는 표 3과 같다.

표 3에서 보는 L-2와 L-5 시험체의 8번째부터 13번째 사이클을 재하진동수 2.0에서 1.0Hz로 줄인 것은 실험에 사용한 MTS 시스템이 큰 변위에서 1.0Hz 이상 작동하지 못하기 때문이다.

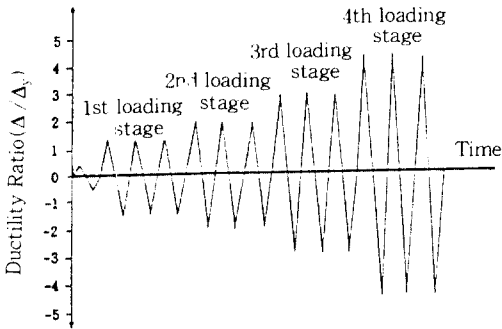


Fig.3 Loading history for beam-column joint specimen

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위곡선

모형시험체와 실물 시험체 실험에서 얻어진 실험결과 값을 서로 비교하기 위하여 모델링 기법이론 [5,6,9]을 이용하여 실험치를 정규화(normalization) 시켰다. 먼저 하중에 대한 정규화는 하중 축척계수 F_r 를 곱하는데 여기서 F_r 은 길이 축척계수 l_r 를 제곱하여 철근비에 대한 비례 값을 곱하여 계산된 값으로

$$F_r = \left(\frac{l_p}{l_m}\right)^2 \frac{(\rho f_y)_p}{(\rho f_y)_m} \quad (1)$$

이다.

여기서, l_p =원형시험체의 길이

l_m =모형시험체의 길이

ρ =주근 철근비

f_y =철근의 항복강도

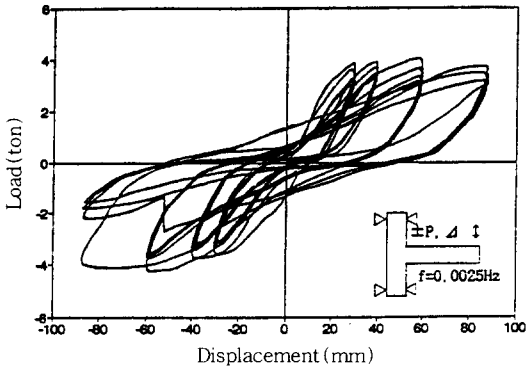
이다.

위 값을 이용하여 크기가 다른 모형시험체는 L-1 시험체를 기준으로 하중에 대하여 F_r 를 곱하여 정규화시키고 변위에 대하여는 길이 축척계수 l_r 를 곱하여 정규화시켰다. 각 시험체의 하중-변위곡선을 정규화시킨 결과는 그림 4(a)~4(j)와 같다.

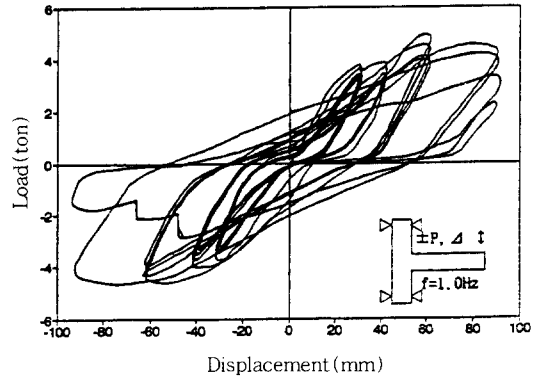
이 그림에서 보는 바와 같이 정적하중 시험체를 정규화시킨 하중이력곡선은 시험체의 크기효과 없이 거의 비슷한 하중-변위곡선을 보여주고 있다. 그러나 동적하중을 작용시킨 시험체의 경우 하중-변위 이력곡선의 모양이 서로 다른 것을 볼 수 있다. 최대하중의 경우 정적하중시험체보다 동

Table 3 Loading rates applied to specimen

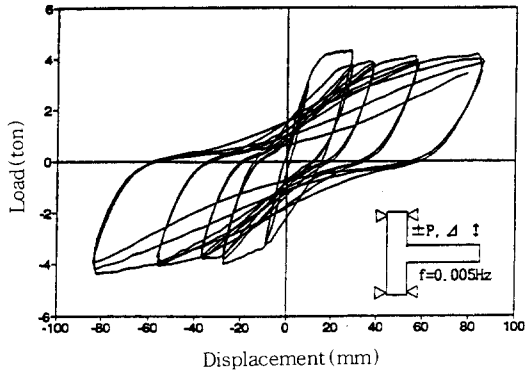
cycle	type	type - S			type - M				type - L			
		S-1	S-2	S-3	M-1	M-2	M-4	M-5	L-1	L-2	L-4	L-5
1 cycle			0.0025 Hz	1.0 Hz	0.005 Hz	2.0 Hz	0.005 Hz	2.0 Hz	0.005 Hz	2.0 Hz	0.005 Hz	2.0 Hz
2~4 cycle	preliminary		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5~7 cycle			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8~10 cycle			-	-	-	-	-	-	-	1.0 Hz	-	1.0 Hz
11~13 cycle			-	-	-	-	-	-	-	1.0 Hz	-	1.0 Hz
			-	-	-	-	-	-	-	1.0 Hz	-	1.0 Hz



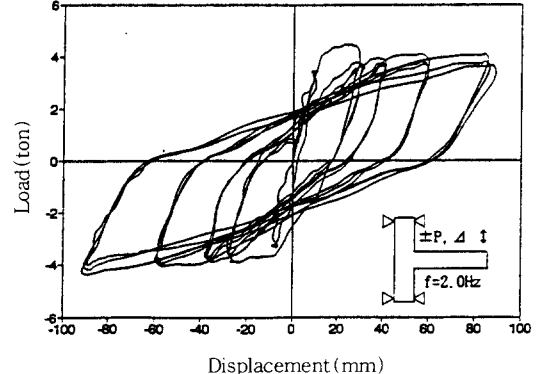
(a) specimen S-2



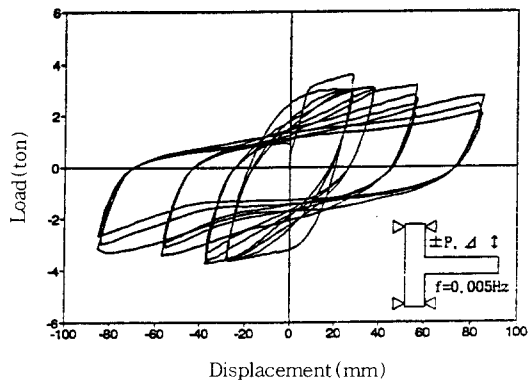
(b) specimen S-3



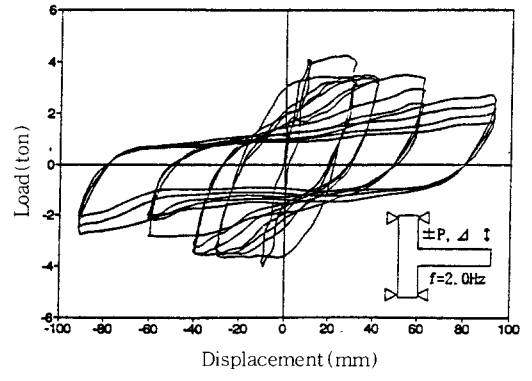
(c) specimen M-1



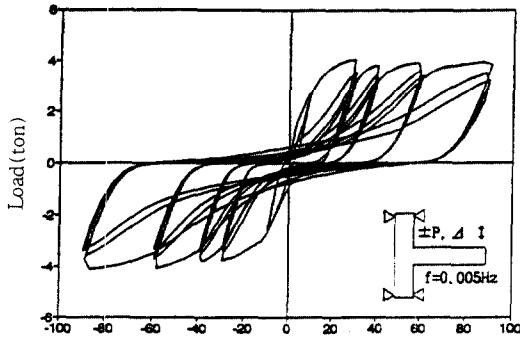
(d) specimen M-2



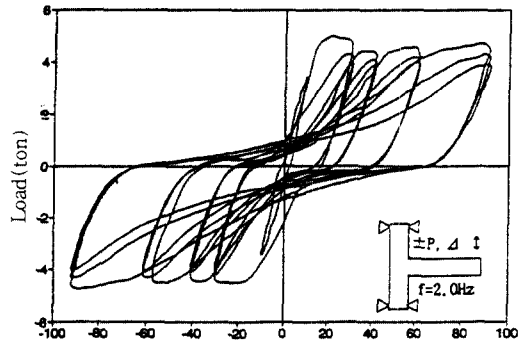
(e) specimen M-4



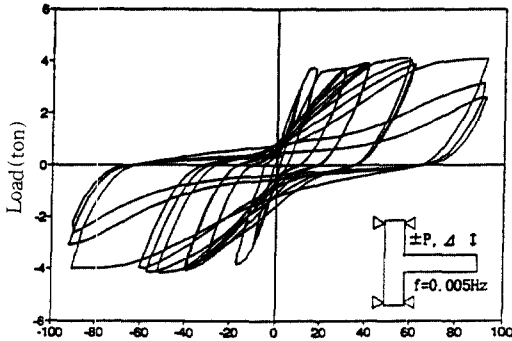
(f) specimen M-5



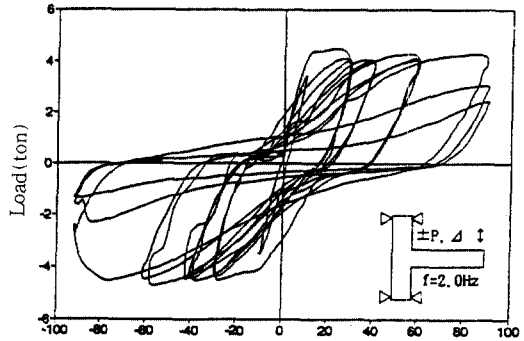
(g) specimen L-1



(h) specimen L-2



(i) specimen L-4



(j) specimen L-5

Fig.4 Normalized load-displacement curve

적하중시험체에서 약 20% 크게 나타나고 있으며, 그림 4(b) 및 그림 4(f) 등에서 보는 바와 같이 대변형이 일어난 후 동적하중에 의해 정적하중에 의한 시험체보다 강도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.2 균열 및 파괴현상

그림 5(a)~5(j)는 각 시험체의 균열 및 파괴현상을 나타낸 것으로, 정적하중을 작용시킨 시험체의 경우 휨 균열이 보 부분에 넓게 분포된 반면, 동적하중일 경우 보-기둥 접합부 면에 균열이 집중적으로 발생되어 기둥과의 경계면 가까이의 피복 콘크리트가 정적하중시험체보다 훨씬 더 앞서

파리되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 시험체에 동적하중이 작용하는 경우 부착응력이 증대되어 철근의 변형이 임계면에 집중되기 때문으로 기존 연구[7]에서 보고된 바와 같다.

3.3 전단변형도

전단변위 측정은 그림 2 에서 보는 바와 같이 4 개의 LVDT를 사용하였다. 전체 전단변위는 2개의 성분으로 구분하였고 그 각각의 식은 다음과 같다. (그림 6 참조)

$$\tau_1 = \left[\sqrt{((D + \delta_1)^2 - H_k^2 - H_v^2)} \right] / H_h \quad (2)$$

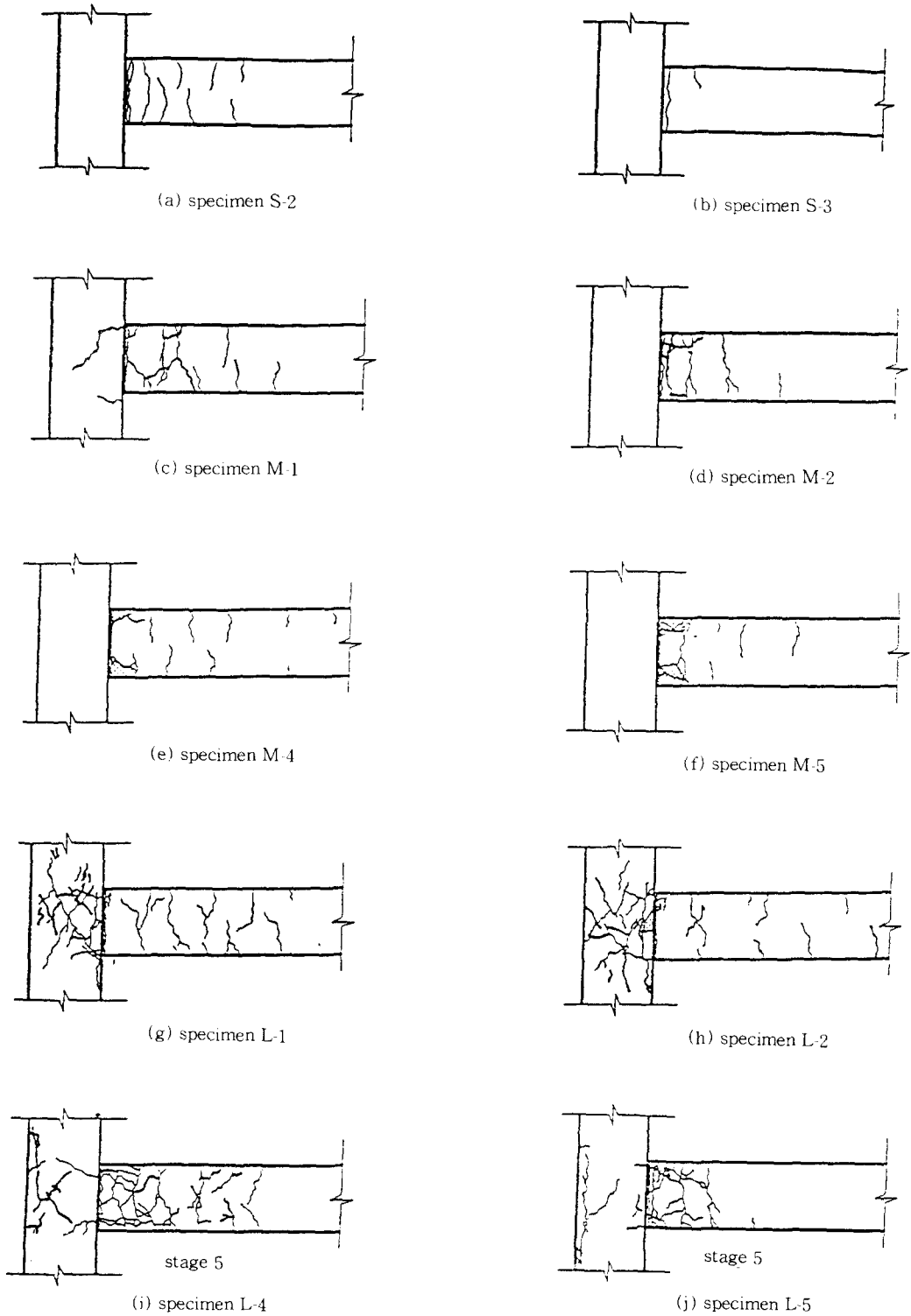


Fig.5 Failure modes for specimens

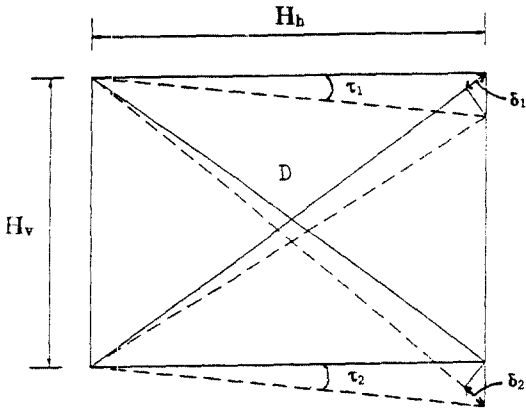


Fig.6 Shear deformation measurement

$$\tau_2 = [H_v - \sqrt{((D + \delta_2)^2 - H_h^2)}] / H_h \quad (3)$$

- 여기서, τ_1 : 전체 전단변위의 첫번째 성분
- τ_2 : 전체 전단변위의 두번째 성분
- D : LVDT의 측정 영역의 대각선 길이
- H_h : LVDT의 수평 측정 길이
- H_v : LVDT의 수직 측정 길이
- δ_1 : LVDT에 의한 길이 변화
- δ_2 : LVDT에 의한 길이 변화

그러므로 전체 평균변위는

$$\tau = (\tau_1 + \tau_2) / 2 \quad (4)$$

위 식을 이용하여 계산한 전단변형도의 크기를 각 하중단계별로 보 부분의 전단변형량과 접합부 부분의 전단변형량으로 나누어 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 같은 양의 철근이라도 보의 주철근이 네가닥으로 배근된 시험체(L-4, L-5 시험체)가 두가닥으로 배근된 시험체(M-1, M-2, L-1, L-2 시험체) 보다 보 부분의 전단변형이 더 크고 상대적으로 접합부 부분에 전단변형이 더 작았다. 이는 주철근에 인장력이 작용할 때 여러 가닥의 철근이 배근되면 철근에 작용하는 응력이 분산되고 내부콘크리트의 탈락이 방지되어 접합부내의 전단변형량이 상대적으로 감소되는 것으로 판단되며 이것은 보-기둥 접합부의 소성힌지를 보 부분으로 유도하려는 내진설계 개념과 일치한다.

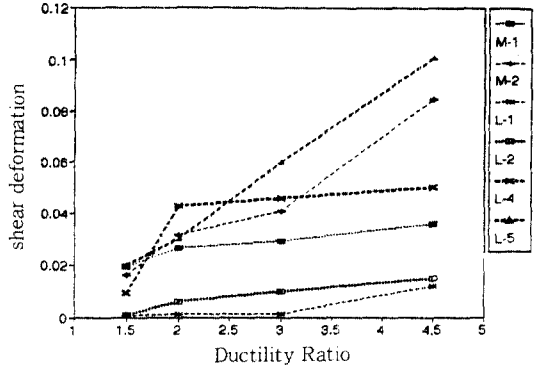


Fig.7 Comparison of shear deformation

3.4 에너지 소산능력

에너지 소산능력은 하중-변위곡선으로 둘러싸인 면적값으로, 그림 8과 같이 시험체별 에너지 소산능력을 비교하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이 정적시험체보다 동적시험체에서 훨씬 높은 에너지 소산량을 나타내고 있다. 이는 동적실험체의 하중-변위 곡선에서는 핀칭현상이 거의 없이 이력곡선의 중앙 부분이 불룩한 형태로 나타났기 때문으로 보인다.

또한, 배근 상태가 B-type인 실험체가 A-type 보다 더 큰 에너지가 소산된 것을 볼 수 있는데, 이는 같은 철근량이라 할지라도 철근의 가닥수가 많은 B-type의 경우 철근의 공칭둘레가 증가되어 부착면적이 커지므로 철근에 가해지는 응력이 분산되어 동적하중에 의한 응력집중현상을 완화시키기 때문으로 판단된다.

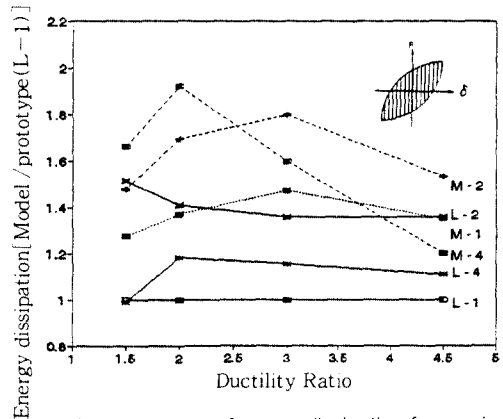


Fig.8 Comparison of energy dissipation for specimens

4. 결 론

철근 콘크리트 구조물의 내진 설계 규준을 보완하는 데 있어 실험 크기의 동적하중 실험결과를 보다 많이 확보하여 합리적인 근거를 제시하는 것은 필수적인 일이다. 이 연구는 실험 크기의 동적하중 실험을 수행하는데에 수반되는 여러가지 경제적, 기계적인 제약을 극복하기 위하여 모형실험을 통하여 실험결과를 예측하기 위한 기초자료를 수집하는 데 연구의 목적이 있다.

이 연구를 통하여 얻어진 자료를 분석하여 내린 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 제하진동수 1.0~2.0Hz의 동적하중이 작용한 시험체는 정적하중이 작용한 시험체보다 평균 15% 정도 높은 최대강도 값을 나타냈으나 반복하여 주기하중이 작용될 경우 강성 및 강도 결손이 상대적으로 빨라 취성적인 파괴 양상을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 주된 좌굴방지와 내부콘크리트의 구속력을 높이기 위해 보-기둥 집합부와 같이 큰 연성이 필요한 부위에서 보다 좁은 간격의 스티럽과 띠철근의 배치를 요구한 내진규정은 합리적인 것으로 판단된다.

(2) 정적하중에 대한 시험체의 균열은 보 부분에 넓게 분포되어 나타난 반면 동적하중일 경우, 보-기둥 집합부에 집중되어 균열의 크기 및 폭이 보다 더 크게 나타난다.

(3) 동적하중이 작용한 부재의 주강은 정적하중이 작용할 때에 비하여 위험단면에서 보다 작은 범위에서 항복하고 균열폭도 크게 나타났다. 이는 동적하중이 작용될 때 철근과 콘크리트 사이의 부착력 증가로 인하여 균열 부위의 철근이 집중적으로 늘어났기 때문으로 판단된다.

(4) 같은 양의 철근이 배근되었다 할지라도 배근된 철근의 갯수가 많은 부재는 더 많은 에너지를 소산시킨다. 이는 부착면적이 커지면 철근에 가해지는 응력이 분산되어 동적효과에 의한 응력 집중현상을 완화시키기 때문으로 판단된다.

(5) 반복하중을 받는 구조물의 이력기동을 규명하기 위해서 일반적으로 많이 수행되어진 정적하중 실험결과를 동적하중 실험결과에 비해 최대내력, 연성 및 에너지 소산량이 서로 다른 것이 확인되었다. 구조물에 동적하중이 작용할 때에는 정적

하중이 작용할 때에 비하여 에너지 소산량과 최대내력이 증가하나, 보다 취성적인 파괴 양상을 보이게 된다.

(6) 동적하중에 대한 모형시험체의 최대내력값을 정규화시켜 실험시험체 최대내력과 비교한 결과 그 차이는 10% 범위 이내로 나타나 이미 알려진 상사법칙에 따라 모형 시험체를 설계하면 비교적 상사성이 잘 유지되는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Mutsuyoshi, H., and Machida, A., "Properties and Failure of Reinforced Concrete Members Subjected to Dynamic Loading", Transactions of the Japanese Concrete Institute, Vol. 6, 1984, pp. 521-528.
2. Chung, L., "Effects of Cyclic Loading Rate on Response of R/C Model Beam-Column Joints and Anchorage-Bond". Ph.D thesis, Northwestern Univ., U.S.A., 1988.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989.
4. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures," ACI Journal, Proceedings Vol, 82, No. 3, May-June 1985, pp. 266-283.
5. V.V.Bertero, "Mechanical characteristics of Materials used in A 1/5 scale Model of A 7-story Reinforced Concrete test structure", Report No. VCB/EERC-83/21 October 1983.
6. Sabnis, Harris. "Structural Modeling and Experimental Techniques," Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series.
7. 정란, 박현수, "Effects of Cyclic Loading Rate on Response of Reinforced Concrete Structures", 진산 구조 공학 학회지, 제 2권 제 3호, 1989. 9, pp. 77-84.
8. 박현수, "반복 하중을 받는 철근 콘크리트 부재의 일학적 기동에 관한 연구", 단국대학교 대학원, 석사 학위 논문, 1989. 2.
9. 박현수, 민정규, 정란, "상사법칙을 이용한 R/C 부재의 모델링 기법", 대한건축학회 논문집 8권 1호 통권 39호, 1992.1, pp. 191-199

(접수일자 : 1995. 2. 20)