Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.14, No.4, pp.513~520, August 2002

모멘트 골조 기둥의 구조 성능평가

한상환[1)*] · 박성일[2)]

[1)]한양대학교 건축공학부 [2)](주)신원구조안전기술단

(2001년 12월 27일 원고접수, 2002년 6월 7일 심사완료)

Evaluation on Seismic Performance of the Columns in Concrete Moment Frames

Sang-Whan Han[1)*] and Sung-il Park[1)]

[1)] Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-171, Korea
[2)] Shinwon Structural Engineering Co. Ltd, Seoul, 138-180, Korea

(Received December 27, 2001, Accepted June 7, 2002)

ABSTRACT

This study is to evaluate the structural performance of columns in concrete moment frame. For this purpose the results of previous experimental studies were collected and compared. The experimental variables considered in this study are existance of lap splice within the possible plastic hinge region during an earthquake, ratio of longitudinal reinforcement, axial load and the transverse reinforcement ratio.

The strength, deformation, ductility capacity and the length of plastic hinge are compared in this study.

Keywords : deformation, ductility, strength, seismic design, details

1. 서 론

일반적으로 중·약진 지역에서는 저층 건물 설계시 중력하중만을 고려한 설계가 수행되어 왔다. 또한, 이러한 건물들이 횡하중에 대한 고려없이 설계되더라도 중·약진에 견딜 수 있는 충분한 강도와 연성을 가지는 것으로 알려져 왔다.

중·약진 지역은 지진의 발생빈도나 그 크기가 강진지역에 비해 상대적으로 작으나 재현주기가 긴 지진의 최대예상지진(maximum considered earthquake) 크기는 강진지역과도 유사할 수 있다[1)]. 따라서, 비내진 상세를 가지는 철근콘크리트 건물의 취약성과 안전성에 대한 내진성능 검증의 필요성을 부각시키고 있다.

철근 콘크리트 구조물에 대한 내진설계에서는 큰 지진 발생시 충분한 에너지 흡수능력과 소산능력(energy absorption and dissipation)을 구조물이 확보하도록 해야 한다. 따라서, 내진 설계에서는 최소한의 설계강도 뿐만 아니라 탄성영역을 넘어 비탄성 변형능력을 보장할 수 있도록 연성능력을 확보해야한다. 이를 위해서는 적절한 배근상세가 확보되어야한다. 일반적으로 내진 상세가 안된 건물의 경우에는 지진발생시 비탄성 변형이 상대적으로 강성이 작은 기둥에서 발생할 가능성이 높다. 본 연구에서는 기둥의 구조성능을 평가하고자 하였다.

이를 위하여 본 연구는 유사한 목적으로 실험이 진행되었던 세 개의 실험연구결과를 비교·분석하였다. 이러한 실험들로부터 산출된 결과를 이용하여 철근 콘크리트 기둥에 대한 구조적 성능을 비교·평가하였다.

본 연구에서 고려한 세 개의 근래의 실험연구는 Han et al (2001)[2)], Reinhorn et al(1994)[3)], Moehle et al (1996)[4)]에 의하여 진행된 것이다. Han et al (2001) 연구(이후 STUDY-H로 명칭)에서는 ACI 318(1999)[4)]의 최소 설계규정 및 상세 조건에 따라 설계된 보통 모멘트골조(OMRCF)의 1층의 내·외부 기둥의 상·하부를 모델링한 4개의 기둥 시험체를 2/3 축소하여 실험하였다. Reinhorn et al(1994) 연구(이후 STUDY-R로 명칭)는 미국 동부지역의 일반적인 설계 방법과 비내진 상세를 가진 골조의 1층 기둥에 대하여 실험하였다. STUDY-H에서는 STUDY-R의 실험결과의 직접적인 비교를 위하여 고려한 건물의 치수를 가능한 한 같게 하였고, 시험체의 종류를 유사하게 하였다. Moehle et al (1996)의 연구(이후 STUDY-M이라 명칭)는 다양한 실험변수를 가진 8개의 시험체로 실험하였다.

본 연구에서는 각 실험결과에서 기둥의 내력, 변형 및 연성능력, 소성힌지 길이들을 이용하여 비교를 통한 콘크리트 기둥의 성능을 평가하였다.

* Corresponding author
Tel : 02-2290-1715 Fax : 02-2291-1716
E-mail : swhan@hanyang.ac.kr

2. 실험 계획

STUDY-H와 STUDY-R의 실험에서는 3층 건물에서 1층 기둥을 대상으로 외부와 내부, 상부와 하부로 나누어 시험체 제작을 하였다. 내부는 일정축력, 외부는 변동축력을 적용하여 실험을 하였다. STUDY-H에서는 2/3 축소하여 제작하였고, STUDY-R은 시험체를 1/3 축소하여 제작하였다. STUDY-H와 STUDY-R의 시험체는 총 4개로 내·외부 기둥의 상·하부 부분을 모델링하였다.

STUDY-M의 시험체는 총 8개로 시험체는 철근비, 철근이음의 유무, 축력비, 대각근의 유무에 따른 변수를 두었다. 시험체는 축소모델을 사용하지 않았고 모든 시험체에 축력은 실험 종료까지 일정하게 작용시켰다.

STUDY-H와 STUDY-R은 1%의 철근비로 주근을 배근하였다. 반면, STUDY-M은 2%와 3%의 주철근비를 사용하였다. STUDY-H에서는 일정축력으로 가력한 내부기둥은 $0.28A_gf_{ck}$, 변동축력으로 가력한 외부기둥은 $0.08\sim0.20A_gf_{ck}$의 축력을 적용하였다. STUDY-R의 실험에서는 내부기둥은 상부와 하부를 각각 $0.39A_gf_{ck}$, $0.30A_gf_{ck}$의 일정축력으로, 외부는 $0.08\sim0.17A_gf_{ck}$의 변동축력을 적용하였다. STUDY-M의 실험에서는 8개의 시험체를 두 부분으로 나누어 각각 $0.12A_gf_{ck}$와 $0.35A_gf_{ck}$의 고정된 축력으로 가력하였다. Table 1과 2는 각각의 실험에서 기둥시험체의 구획 및 배근, 각 시험체의 변수에 대하여 정리한 것이다.

Table 3은 각각의 시험체 상세치수를 비교하기 위하여 축소하기 이전 치수로 환산하여 나타낸 것이다. 모든 단위는 SI단위를 사용하였다.

3. 실험결과 비교 및 분석

3.1 이력거동(hysterestic behavior)

STUDY-H의 실험으로부터 측정된 이력곡선 상에서 철근이음이 존재하지 않는 상부기둥(OIN, OEN)은 이음이 있는 하부기둥(OIL, OEL)에 비하여 우수한 에너지 소산능력과 안전한 이력거동(stable hysterestic behavior)을 보여준다. 특히, 낮은축력이 작용하는 외부 하부기둥(OEL)은 가장 좁은 이력곡선을 보여준다. 모든 시험체는 변형각 ± 0.5%까지 거의 탄성적인 거동을 보여준다.

Table 1 Characteristics of the STUDY-H and STUDY-R column specimens

Classification	Location		Specimen name	Loading plan	Lap splice
STUDY-H* (STUDY-R*)	Interior	Lower	OIL (SP1)	Constant axial load	○
		Upper	OIN (SP2)		×
	Exterior	Lower	OEL (SP3)	Fluctuation axial load	○
		Upper	OEN (SP4)		×

Table 2 Characteristics of the STUDY-M column specimens

Classification	Specimen name	Lap splice	Loading plan	Transverse reinforcement
STUDY-M*	3CLH18	×	Low level axial load ($P=0.12A_gf_{ck}$)	Only hoop ties (H) and 45.72cm tie spacing
	2CLH18			
	3SLH18	○		
	2SLH18			
	2CMH18	×	Moderate level axial load ($P=0.35A_gf_{ck}$)	
	3CMH18			
	3CMD12			Hoop + Diamond (D) ties and 30.48cm tie spacing
	3SMD12	○		

Table 3 Comparison of the specimens of STUDY-H, R, and M

Classification	Tie spacing (cm)	Lap splice spacing (cm)	Lap splice length (cm)	Distance of the 1st tie from the base (cm)	Longitudinal bar ratio (%)	Concrete compressive strength (kgf/cm^2)	Yield strength of longitudinal bars (kgf/cm^2)	Yield strength of transverse bars (kgf/cm^2)	Sectional area of column (cm^2)	Height (cm)
STUDY-H*	30	30	52.5	15	1.01	246	4046	3814	33×33	300
STUDY-R*	30	15	46	15.24	1.0	239, 306	4569	3937	31×31	320
STUDY-M*	46(30.5)	30.5	51(63.5)	10	2.0, 3.0	260,281,337	3375	4078	46×46	294

철근이음이 없는 시험체(OIN, OEN))는 동일 변형각에 대한 2번째 싸이클에서 강도의 저하가 거의 발생하지 않는다. 그러나, 철근이음이 있는 시험체(OIL, OEL)는 변형각 ± 3% 이상에서 동일 싸이클에서 강도저감이 나타나기 시작한다. 특히, OEL(철근이음이 있는 외부 하부기둥) 시험체는 축력이 낮은 부가력시 두 번째 싸이클에서 강도저감이 크게 나타났을 뿐만 아니라 변형각 증가에 따라 강도저감이 현저하게 나타났다.

STUDY-R의 실험에서 이력거동의 특성은 STUDY-H와 매우 유사한 양상을 보였다. 변형각의 증가에 따른 강도손실이 철근이음의 유무에 따라 명확한 차이를 보였다. 특히, 본연구와 마찬가지로, 철근이음이 있는 외부 하부기둥(SP 3)은 축력이 낮은 부가력시 변형각이 증가할수록 강도 저감이 두드러지게 나타났다.

STUDY-M의 실험에서 모든 시험체에서 변형각이 증가함에 따라 급격한 강도저감이 발생하였다. 이는 전단이 모든 시험체(8개)의 지배적인 파괴모드임을 나타내는 것이다. 횡철근비가 2%이고 낮은 축력($0.12 A_g f_{ck}$)으로 가력한 2CLH18과 2SLH18은 변형각에 증가에 따른 강도저하가 다른 시험체에 비해 작은 것으로 나타났다. 특히, 이음이 존재하지 않는 2CLH18는 상당한 변형각까지 강도저감이 거의 일어나지 않았다. Table 4는 각 연구의 이력곡선으로부터 구한 실험결과들을 정리한 것이다.

3.2 휨강도

Fig. 1은 각각의 실험에 대한 공칭강도에 대한 실험에서 얻어진 최대강도의 비를 나타낸 것이다. 이 그림에서

Table 4 Test result of specimens

Specimen			$\frac{P_u}{A_g f_{ck}}$ (1)	V_{max}(t)(2)	Δ_{max}(3) (㎜)	μ_Δ(4)	θ_u(%)(5)	M_{ACI}(6)	$\frac{M_{max}}{M_{ACI}}$ (7)	V_{ACI}(8)	V_p(9)	$\frac{V_p}{V_{ACI}}$ (10)
STUDY-H*	OIL	+	0.28	5.1	34.9	4.26	3.49	3.75	1.33	7.58	3.86	0.51
		-		-5.1	-35.3	4.46	3.53	-3.75	1.33	7.58	3.86	0.51
	OIN	+	0.28	4.8	44.5	4.41	4.45	3.75	1.28	7.58	3.86	0.51
		-		-5.0	-43.5	4.39	4.35	-3.75	1.33	7.58	3.86	0.51
	OEL	+	0.2	4.24	42.5	4.34	4.25	3.4	1.25	7.1	3.32	0.47
		-	0.07	-3.3	-35.3	3.02	3.53	-2.6	1.25	6.46	2.65	0.41
	OEN	+	0.2	4.94	45.4	4.59	4.54	3.4	1.45	7.1	3.32	0.47
		-	0.07	-2.89	-57.5	6.05	5.75	-2.6	1.11	6.46	2.65	0.41
STUDY-R*	SP1	+	0.30	0.95	22.4	4.67	4.2	0.39	1.3	1.61	0.73	0.45
		-		-0.82	-21.87	5.47	4.1	-0.39	1.12	1.61	0.73	0.45
	SP2	+	0.39	0.95	27.2	5.1	5.1	0.46	1.1	1.61	0.86	0.54
		-		-1	-26.67	5.56	5	-0.46	1.16	1.61	0.86	0.54
	SP3	+	0.17	0.75	21.87	3.15	4.1	0.32	1.25	1.62	0.60	0.37
		-	0.08	-0.45	-15.47	2.9	2.9	-0.24	1.00	1.49	0.45	0.30
	SP4	+	0.17	0.73	27.74	5.78	5.2	0.36	1.08	1.62	0.67	0.42
		-	0.07	-0.59	-26.67	7.69	5	-0.28	1.12	1.49	0.53	0.35
STUDY-M*	3CLH18		0.12	27.7	30.48	1.4	1.03	47.5	0.96	22.2	32.2	1.44
	2CLH18			24.5	76.42	3.5	2.59	34.79	1.09	24.5	23.6	0.96
	3SLH18			27.2	30.48	1.7	1.03	47.5	0.89	22.2	32.2	1.44
	2SLH18			23.6	60.96	3.2	2.07	34.79	1.33	24.5	23.6	0.96
	2CMH18		0.35	32.2	30.48	1.7	1.03	41.94	1.24	27.7	28.6	1.03
	3CMH18			34.5	30.48	1.5	1.03	54.38	0.91	28.6	36.7	1.28
	3CMD12			36.3	45.72	2.4	1.55	54.38	1.06	35.8	36.7	1.02
	3SMD12			38.6	45.72	2.0	1.55	53	1.14	34.9	35.8	1.03

(1) = axial load ratio (2) = maximum shear force (3) = maximum displacement (4) = displacement ductility (5) = drift angle
(6) = the moment capacity calculated using ACI 318-99 procedures
(7) = the ratio of the maximum moment resistance(M_{max}) of the specimen to M_{ACI}
(8) = the nominal shear strength according to ACI 318-99
(9) = the shear or corresponding to flexural yielding with flexural strength M_{ACI} or $2M_{ACI}/l$, where l = the column clear height
(10) = the ratio of V_p to V_{ACI}

*Note that STUDY-H, STUDY-R, and STUDY-M denote the study by Han et al. (2001), Reinhorn et al. (1994), and Moehle et al. (1996), respectively.

M_{ACI}는 ACI 318(1999) 기준에 따라 각 시험체에 적용된 축력과 재료실험에서 얻어진 결과를 적용하여 기둥의 축력-모멘트 상관도로부터 구한 값이다. M_{max}는 각각의 실험으로부터 측정된 최대 모멘트강도이다.

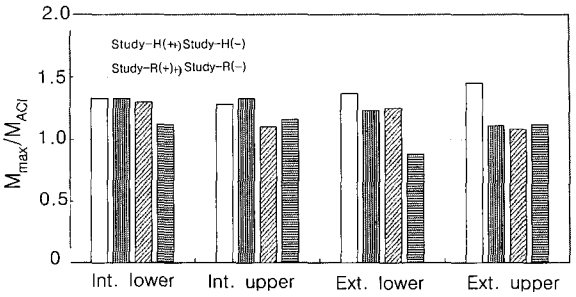
Fig. 1(a)에서 나타난 바와 같이 ACI 318(1999)에서 요구하는 최소 기둥 이음길이를 갖도록 설계된 OMRCF의 경우는 모든 시험체가 공칭 수평강도를 초과하는 최대강도를 발현하는 것으로 나타났다. 축력비가 낮은 OEL, OEN의 부가력시 공칭강도 이후 최대강도 발현비율이 OIL, OIN에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. 또한, STUDY-R의 경우에도 SP3 시험체의 부가력시를 제외하면 모든 시험체가 공칭강도를 초과하였다. STUDY-R의 철근이음이 있는 외부기둥 시험체(SP3)는 STUDY-H에 비해 비교적 짧은 철근 이음길이를 가지고 횡보강근의 배근간격은 1/2배로 조밀하게 배근된 시험체로 낮은 축력으로 가력된 부가력시 기둥의 내력성능에 있어서 철근 이음길이가 중요한 변수임이 나타났다.

STUDY-M의 실험에서는 3%의 주철근비를 가지고 횡보강근은 띠철근만으로 배근되었고, 배근간격은 비교적 넓은 3CLH18, 3SLH18, 3CMH18 시험체가 공칭강도 이하의 내력수준을 보였다. 모든 시험체가 요구 이음길이를 만족하는 철근 이음길이를 가지므로, 철근이음으로 인한 내력저하는 무시할 수 있을 정도이다. 세 시험체는 과다한 주철근비와 부적당한 배근간격으로 인하여 공칭강도 발현 이전에 전단에 의하여 파괴가 이루어져 공칭강도에 미치지 못하는 내력을 보여 주었다.

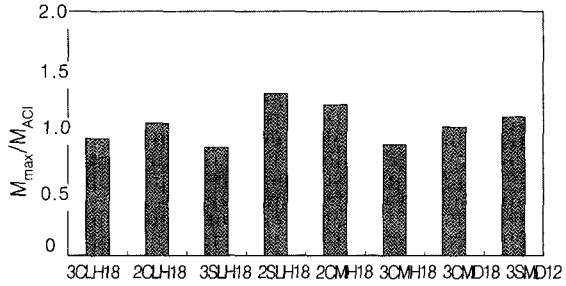
3.3 변형 및 연성능력

연성(ductility)은 비탄성 변형능력을 평가할 수 있는 지표로 이용할 수 있다. 일반적으로 연성능력의 범위(limit)는 강도의 저감정도에 따르고 변형도, 곡률, 회전각, 변위로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 변위-연성비로 연성능력을 정의하였으며, Fig. 2와 같이 Δ_{max}와 θ_u는 최대내력의 80%에 해당하는 강도에서 평가한 최대변위와 변형각(변형능력)을 나타내고, 항복변위와 최대변위의 비를 변위-연성비(μ_Δ ; displacement ductility ratio)로 정의한다. 이때, 항복변위(Δ_y)는 저감된 강성을 고려한 방법으로 최대내력의 75%에서 평가된 할선강성(secant stiffness)으로부터 구한다.

Fig. 3(a)의 STUDY-H, STUDY-R 실험에서 변형능력은 일정축력을 적용한 시험체의 경우 철근이음(lap-splice)이 있는 시험체에 비해 철근이음이 없는 시험체가 변형능력이 더 우수함을 알 수 있다. 변동축력을 가한 시험체중 철근이음이 있는 시험체의 경우에는 축력이 감소하는 부가력시 3%의 변형각에 도달하면 급격한 내력저하가 발생하였다. 가장 큰 변형능력을 가진 시험체는 철근이음이 없는 외부기둥이었다. 따라서 변형능력면에서는 축력이 낮은 외부기둥이 내부기둥에 비하여 다소 큰 변형능력을 보



(a) STUDY-H, STUDY-R



(b) STUDY-M

Fig. 1 Maximum strength ratio

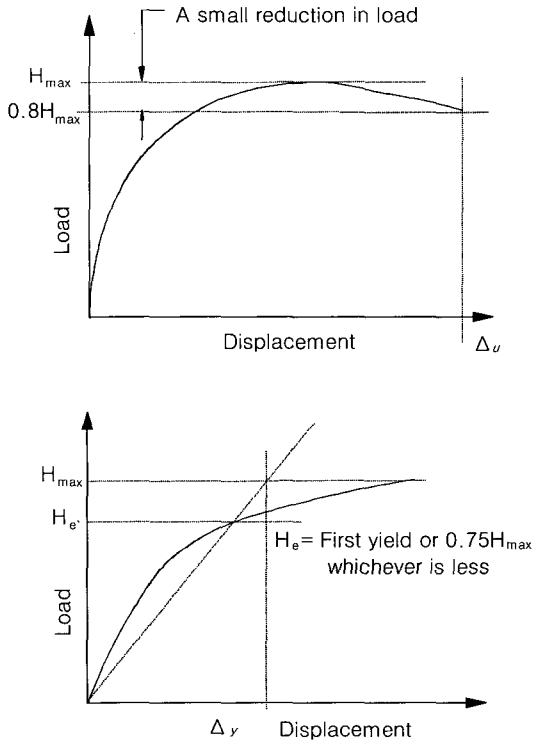


Fig. 2 Definition of yield and maximum displacement

유하는 것으로 나타났다. 그러나, 철근이음이 있는 기둥의 경우 부가력시 내부기둥과 유사한 것으로 나타났다. 이는 철근이음이 외부기둥의 변형능력에 큰 영향을 주고 있기 때문이라고 판단할 수 있다.

Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 STUDY-M (1996)의 실험에서 변형능력은 앞의 두 실험에 비해 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 모든 시험체가 전단파괴에 의해 지배됨으로 인하여 시험체의 휨 성능을 충분히 발휘하지 못하기 때문이다. 가장 큰 변형능력을 보인 것은 2CLH18과 2SLH18 시험체로 2 %이상의 변형능력을 보였다. 다음은 횡보강근의 배근이 강화된 두 시험체이다.

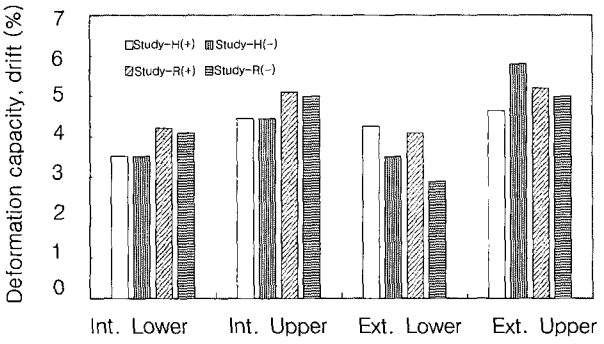
3.3.1 축력비에 따른 연성능력

Fig. 4(a)에서 보이는 것과 같이 STUDY-H와 STUDY-R의 실험결과로부터 평가한 축력비에 따른 연성능력은 비슷한 양상을 보인다. 즉, 축력이 일정한 내부 시험체의 경우는 거의 유사한 연성능력을 나타낸 반면 축력이 변하는 외부 시험체는 철근유무에 따라 변형능력이 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 철근이음이 존재하는 외부기둥(OEL, SP3)은 축력이 0.1 $A_g f_{ck}$이하로 감소하는 부가력시 연성능력이 감소하는 반면, 철근이음이 없는 외부기둥(OEN, SP4)은 축력의 감소와 함께 연성능력이 증가함을 알 수 있다. 축력이 작게 작용되고 철근이음이 있는 시험체(OEL, SP3)의 경우 축력보다 휨에 의한 거동을 함으로 철근 이음부의 부착 미끄러짐(bond slip)으로 인하여 연성능력이 감소한 것으로 판단된다.

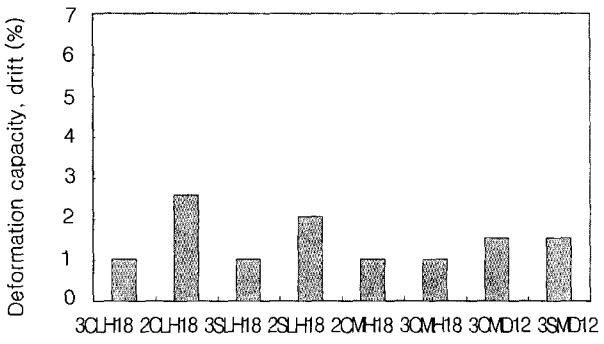
Fig. 4(b)의 STUDY-M의 시험체에서는 주철근비가 3 %이상인 경우에는 휨철근비를 가지는 시험체에서는 축력비에 상관없이 전체적으로 낮은 연성능력을 나타내고 있다. 또한, 비교적 높은 축력으로 가력된 모든 시험체가 2.5이하의 낮은 연성능력을 나타내고 있다. 그러나, 축력비가 낮은 경우에서는 변형능력에서와 마찬가지로 시험체 중 주철근비가 2 %인 2CLH18과 2SLH18은 다른 시험체에 비해 우수한 연성능력을 나타내고 있다. 철근이음을 제외한 같은 변수를 가지는 시험체와의 비교를 통하여 변형능력 감소의 원인으로 철근이음이 기여함을 알 수 있으나, STUDY-H와 STUDY-R로부터의 예측과는 다르게 소요 이음길이를 상회하는 STUDY-M의 경우 철근이음이 연성능력에 미치는 영향이 다소 낮음을 알 수 있다.

3.3.2 전단강도비에 따른 연성능력

Fig. 5는 전단강도비에 따른 연성능력을 나타낸 그림

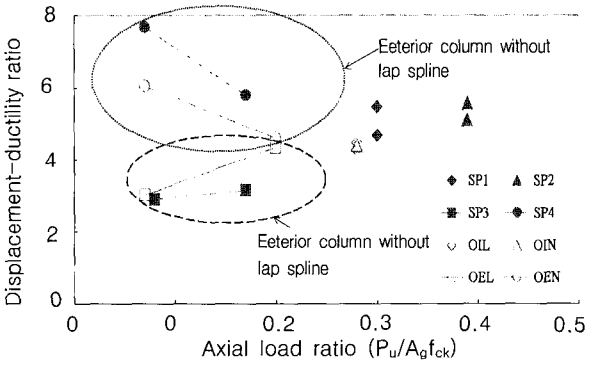


(a) Study-H, Study-R

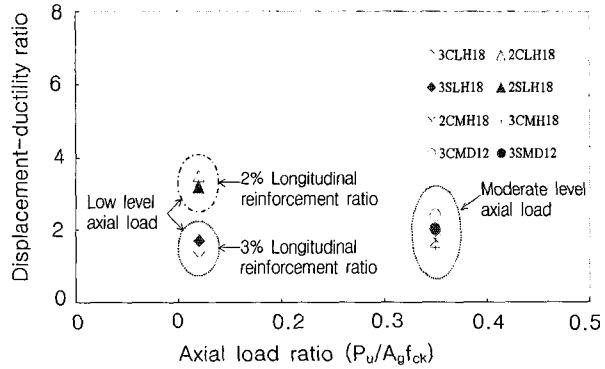


(b) Study-M

Fig. 3 Maximum deformation capacity

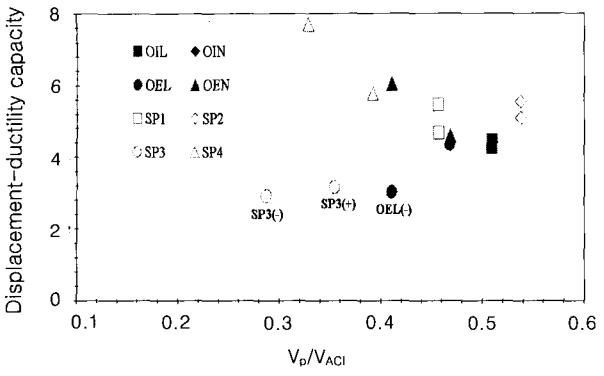


(a) Study-H, Study-R

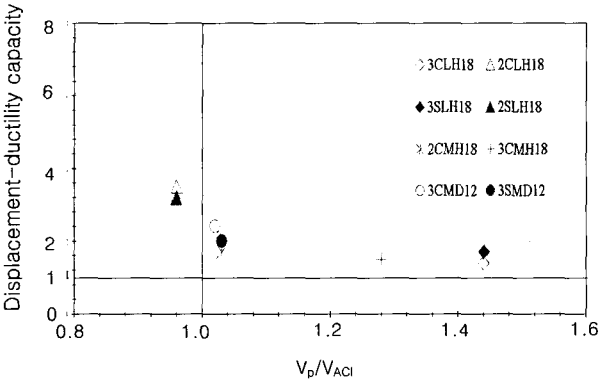


(b) Study-M

Fig. 4 Displacement ductility capacity as axial load ratio



(a) Study-H, Study-R



(b) Study-M

Fig. 5 Displacement ductility capacity as a function of the shear demands

이다. 전단강도비란 기준(ACI 318)에 따라 구한 전단강도 (V_{ACI})와 모멘트 강도(M_{ACI})에 상응하는 전단강도 (V_p)값의 비이다.

STUDY-H와 STUDY-R의 경우는 전단력비 (V_p/V_{ACI})가 0.5이하의 비를 보임으로 모든 시험체가 휨파괴에 의해 지배됨을 알 수 있다. 하지만, STUDY-M의 시험체의 경우는 대부분의 시험체가 휨-전단 또는 전단파괴가 예상되는 1.0 이상의 비를 나타내고 있다. 이는 STUDY-M의 시험체의 경우 주근의 철근비가 2 %, 3 % (STUDY-H, STUDY-R의 경우는 1 %)이기 때문이다.

변위 연성비에 대한 비교 결과는 변형능력에 대한 비교 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)의 STUDY-H와 STUDY-R의 시험체의 경우는 변위-연성능력에서 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

즉, 내부시험체는 철근이음의 유무에 상관없이 두 실험에서 모두 4.0 이상의 변위-연성비를 나타내고 있으나, 외부 시험체의 경우는 철근이음이 없는 시험체(OEN, SP4)는 내부 시험체 이상의 연성능력을 나타내고 있지만, 철근이음이 있는 시험체(OEL, SP3)의 경우는 3.0 정도의 변위-연성비를 나타내고 있다. 따라서 위의 결과에 따라 보통 모멘트골조 기둥의 경우 철근이음이 있는 외부 하단기둥이 내부기둥에 비하여 지진에 대한 취약부라 할 수 있다.

Fig. 5(b)에서 전단력비(V_p/V_{ACI})가 1이하인 2CLH18과 2SLH18 기둥시험체는 각각 3.5, 3.2의 변위연성비를 보인다. 반면, 전단력비 (V_p / V_{ACI})가 1이상인 나머지 6개의 시험체들은 모두 1.4~2.4의 변위연성비를 나타내고 있다.

세 실험에 대한 변위-연성비의 실험결과로부터 휨에 의해 지배를 받는 기둥시험체는 2.9이상의 변위연성비를 가지며, 전단에 의해 지배를 받는 기둥시험체는 2.4이하의 변위-연성비를 나타낸다.

3.4 소성힌지 길이

STUDY-H와 STUDY-R의 실험에서는 기둥양면에 설치한 6개의 변위계를 이용하여 구한 모멘트-곡률 관계로부터 소성힌지를 평가하였다. 평가 방법은 Park (1975)[5]과 Paulay (1992)[6]에 따라 모멘트, 곡률, 처짐 관계를 이용한 등가 소성힌지 길이로 각 단계별 소성힌지를 평가하였다. 이러한 등가 소성힌지 길이는 최대곡률에서의 최대 콘크리트 변형도와 함께 부재의 비탄성 변형을 가능하게 하는 소성 회전각을 평가하는 데 중요한 변수이다.

$$\theta_p = \phi_p L_p = (\phi_m - \phi_y) L_p \tag{2a}$$

$$\Delta_p = \theta_p (L - 0.5 L_p) \tag{2b}$$

$$\Delta_P = (\phi_m - \phi_y) L_p (L - 0.5 L_p) \tag{2c}$$

$$\frac{L_p}{h} = \frac{L}{h}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2(\Delta_m - \Delta_y)}{L(\phi_m - \phi_y)}}\right) \tag{2d}$$

θ_p : 소성변형각 ϕ_y : 항복곡률 ϕ_m : 최대곡률
L_p : 등가소성힌지길이 Δ_p : 소성변위
Δ_y : 항복변위 Δ_m : 최대변위

기둥의 비탄성 회전을 가능하게 하는 소성힌지는 실험결과 기둥 하부에서 발생하고, 등가소성힌지 길이 L_p에서 발생하는 소성회전각은 식 (2a)과 같이 주어진다. 소성회전각은 비탄성 변형을 유지하도록 하는 부재단면의 중요한 성능(capacity)이다. 소성회전각이 소성힌지의 중심에 집중한다고 가정하여 기둥 단부에서의 소성변형은 식 (2b)로 나타낼 수 있고, 이 식에 식 (2a)을 대입하여 식 (2c)를 유도할 수 있다. 식 (2d)은 이것을 기둥의 단면크기(h)로 나누어 무차원화 하였다.

일반적으로 알려진 바와 같이 소성힌지 길이는 비탄성 이후의 변형각의 크기와는 연관성이 없는 것으로 보이며, 다만 축력비에 비례하여 소성힌지의 길이가 커짐을 알 수

있다. 또한, 철근 이음이 있는 시험체의 소성힌지 길이가 철근이음이 없는 시험체에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있다.

STUDY-H와 STUDY-R의 하중-곡률 곡선으로부터 평가된 등가 소성힌지 길이(L_p)는 높은 수준의 축력을 받는 내부기둥은 각각 0.85~1.08h , 0.74~1.25h 범위이며 상대적으로 낮은 축력이 가해지는 외부기둥의 경우 각각 0.47~0.8h, 0.47~0.6h 범위이다

Fig. 6은 등가소성힌지 길이에 대한 STUDY-H와 STUDY-R의 실험결과와 기존 연구자들에 의해 제안된 식 (3)과의 비교를 나타낸 것이다.

$$\text{Sawyer(1964)} : L_p = 0.25d + 0.075z \quad (3a)$$

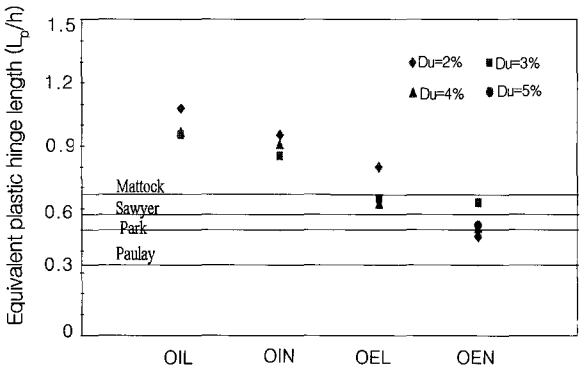
$$\text{Mattock(1967)} : L_p = 0.5d + 0.05z \quad (3b)$$

$$\text{Park(1987)} : L_p = 0.08L + 6d_b \quad (3c)$$

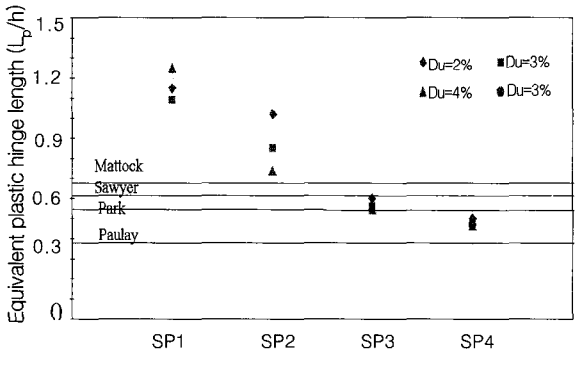
$$\text{Pauley(1991)} : L_p = 0.08L + 0.15d_b f_y \text{ (ksi)} \quad (3d)$$

여기서, z와 L은 임계단면으로부터 변곡점까지 거리이다.

축력비가 0.28~0.39인 STUDY-H와 STUDY-R의 내부기둥 시험체에 대해서는 모든 실험식이 등가소성힌지 길이가 실험결과에 비해 매우 작게 평가됨을 알 수 있다. 외부기둥 시험체에 대한 실험식과의 비교는 내부기둥에 비해 비교적 일치함을 보이나, 철근이음의 유무에 따른 등가소성힌지 길이의 명백한 차이는 간과하고 있음을 알 수 있다.



(a) Study-H



(b) Study-R

Fig. 6 Equivalent plastic hinge length at each drift

기존의 식들은 기둥의 기하학적인 치수나 단면물성으로만 평가하므로 STUDY-H와 STUDY-R의 축력수준이나 철근이음의 유무에 따른 변수들이 있는 실험결과와는 차이가 있음을 알 수 있다.

그러므로, 기둥의 등가소성힌지 길이를 평가함에 있어 기하학적인 치수나 재료의 물성 뿐만 아니라 축력수준이나 철근이음에 대한 고려를 충분히 하여야 한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 STUDY-H, STUDY-R, STUDY-M의 실험결과를 이용하여 철근 콘크리트 모멘트 골조의 기둥의 구조적 거동을 비교·평가하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) ACI 기준 식에 의해 설계된 STUDY-H의 모든 시험체는 공칭강도를 상회하는 최대강도를 발현하였다. 따라서, OMRCF 기둥의 철근이음길이, 띠철근 간격은 내·외부, 상·하부에 상관없이 강도면에서 만족스러운 것으로 평가되었다. 그러나, STUDY-R의 시험체중 철근이음이 있는 외부기둥 시험체(SP3)는 공칭강도에 못 미치는 내력을 보였다. 이는 철근이음 길이가 기둥 내력저하의 주된 요인이 됨을 나타낸 것이라 할 수 있다.

2) 주철근이 3 %로 배근된 STUDY-M의 시험체중 횡보강근이 강화된 시험체를 제외한 모든 시험체가 공칭강도 이하의 최대강도를 나타냈다. 반면, 철근비를 제외하고는 같은 변수를 가지는 2 %의 주철근비를 가지는 시험체들은 공칭강도를 상회하는 최대강도를 나타냈다. 따라서, 횡보강근이 강화되지 않은 3 % 이상의 주철근을 배근한 시험체는 강도설계에 미흡한 실험결과를 도출할 수 있다.

3) STUDY-H와 STUDY-R의 실험에서 변위연성비로 평가한 연성능력은 내부시험체는 4.0이상, 외부시험체는 2.9이상으로 나타났다. 두 실험에서 철근이음이 있는 외부시험체가 가장 낮은 값(각각 2.9, 3.0)을 나타내었다. 이는 비탄성 변형시 외부기둥의 경우 철근이음의 영향이 매우 큰 것임을 나타낸 것이라 할 수 있다. 보통 모멘트골조 기둥의 경우 변형능력을 향상시키기 위하여 철근 이음부의 강화된 철근상세가 필요하다.

4) STUDY-M의 실험으로부터 연성능력은 철근이음 유무와 상관없이 기둥파괴 형태와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 전단파괴가 예상되는 기둥($V_p/V_{ACI} > 1$)

에 비해 휨파괴가 예상되는 기둥(V_p/V_{ACI} < 1)이 2~3배 이상의 연성능력을 나타냈다.

5) 소성힌지길이는 축력의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났다. 외부기둥은 소성변형과 대부분의 피해가 기둥하단의 최대모멘트 영역에 집중되어 발생하였고, 내부기둥은 잠재적인 소성힌지 영역에 걸쳐 소성변형과 피해가 분포함을 알 수 있다. 또한 철근이음이 있는 경우 더 큰 소성힌지 길이가 발생한 것으로 나타났다. STUDY-H와 STUDY-R의 등가소성힌지길이는 내부기둥의 경우 각각 0.85~1.08h, 0.74~1.25h 범위이며 외부기둥은 각각 0.47~0.8h, 0.47~0.6h범위이다.

기존 식들은 실험결과로 얻은 소성힌지 길이를 예측하는 데 차이를 보였다. 기존 식들은 등가소성힌지 길이를 평가하는 데 부재의 기하학적인 치수나 재료물성 뿐만 아니라 축력수준, 철근이음에 대하여서도 고려하여야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원하에 이루어진 것으로 이에 감사를 표한다.

참고문헌

1. Han, S. W. and Lee, L. H., *"Submitted to Journal of Structural Engineering,"* ASCE, Sep., 2001.
2. Luis E. Aycardi, John B. Mander, and Andrei M. Reinhorn, "Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed only for Gravity Loads : Experimental Performance of Subassemblages," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 5, Sep.-Oct. 1994, pp.552~563.
3. Lynn, A., Moehle, J., Mahin, S. A., and Holmes, W. T., "Seismic Evaluation of Existing RC Building Columns," *Earthquake Spectra,* Vol 12, No. 4, 1996, pp.715~739.
4. American Concrete Institute, *"Building Code Re- quirements for Reinforced Concrete,"* ACI 318-99, Detroit, Michigan, 1999.
5. Park, R. and Paulay, T., *"Reinforce Concrete Structures,"* John Wiely and Sons, 1975, pp.242~250.
6. Paulay, T. and Priestley, M., *"Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings,"* John Wiley and Sons, 1992, pp.135~142.

요 약

본 연구는 철근콘크리트 모멘트골조 기둥의 구조적인 성능을 평가하는 것이다. 이를 위하여 기존에 진행된 연구들의 실험결과를 모아 비교하였다. 본 연구에서 고려하는 실험변수는 소성힌지 부분에서 철근이음 유무, 종 방향 철근 비, 횡 방향 철근 비, 축력비이다.

또한, 본 연구에서는 시험체의 강도, 변위, 연성능력과 함께 소성힌지 길이를 비교하였다.

핵심용어 : 변형, 연성능력, 강도, 내진설계, 배근상세