

횡보강근 배근형상에 따른 RC 기둥의 연성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Ductility of RC Columns According to Configuration of Transverse Reinforcement

김민준¹⁾ 김도진²⁾ 김상우³⁾ 이정윤⁴⁾ 김길희^{5)*}
Kim, Min Jun Kim, Do Jin Kim, Sang Woo Lee, Jung Yoon Kim, Kil Hee

Abstract

This paper estimates the ductility of reinforced concrete columns according to configurations of transverse reinforcement. A total of 8 reinforced concrete columns were cast and tested in flexure. The test variables in this study were the configurations, yield strength, and amount of transverse reinforcement. The specimens had a cross-section of 250×250mm and had a shear span-to-depth ratio of 4.1 to induce flexural failure. In the test, cyclic lateral load was applied to the specimens with a constant axial load. The experimental result indicated that the specimens with proposed configurations of transverse reinforcement showed higher ductility and energy dissipation capacity than the specimens with rectangular tie.

Keywords : RC Column, Ductility, Configuration, Transverse reinforcement, High-Strength Reinforcement

1. 서론

최근 원자재 가격 상승으로 인하여 자원 절감과 시공성 향상에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다. 철근콘크리트(RC) 기둥은 직사각형 단면을 가지는 경우 주철근의 좌굴을 방지하고 연성을 확보하기 위하여 외부 띠철근과 함께 내부 띠철근을 일반적으로 사용하고 있다. 내부 띠철근을 사용할 경우에는 시공성 저하와 철근량 증가와 같은 단점을 가진다. 따라서 직사각형 RC 기둥의 연성을 확보하면서도 시공성을 향상시키고 철근량을 감소시킬 수 있는 연구가 필요하다.

직사각형 RC 기둥의 연성을 확보하면서도 시공성을 향상시키고 철근량을 감소시키기 위해서는 횡보강근의 배근형상을 달리하거나 항복강도를 높이는 방법 등이 있다. 최근 직사각형 RC 기둥의 연성능력을 효율적으로 확보하

기 위하여 횡보강근의 배근형상에 따른 횡구속 능력에 대한 연구가 진행되어 왔다(Sakai et al., 1989, Sheikh et al., 1997, Yin et al., 2011). 그렇지만 횡보강근 배근형상에 따른 직사각형 RC 기둥의 연성능력에 관한 연구는 아직 기초적인 단계로 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

우리나라의 경우 현행 구조설계기준(Korea Concrete Institute, 2007)에서는 기둥에 적용되는 횡보강근의 강도를 띠철근은 400MPa, 나선철근은 700MPa로 제한하고 있다. RC 기둥의 연성능력을 효율적으로 확보하기 위하여 고강도 횡보강근에 대한 기초자료가 필요한 만큼 이에 대한 연구도 절실히 필요한 실정이다.

이 연구에서는 횡보강근의 배근형상과 횡보강근량 및 횡보강근 항복강도를 달리하여 직사각형 RC 기둥의 연성능력을 평가하였으며 이를 기반으로 보다 합리적인 횡보강근 배근형상을 제안하고자 한다.

1) 공주대학교 건축공학과 박사과정
2) 누리구조엔지니어링 사원
3) 공주대학교 건축공학과 연구교수
4) 성균관대학교 건축공학과 교수
5) 공주대학교 건축공학과 부교수, 교신저자

* Corresponding author : kimkh@kongju.ac.kr 041-521-9335

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험 계획

2.1 사용 재료

이 연구에서는 Table 1과 같이 배합강도 30MPa인 콘크리트를 계획하였다. 콘크리트의 배합에 사용된 굵은골재의 최대치수는 10mm, 물시멘트비는 38.7%로 계획하였다. 콘크리트 타설 후 실험체는 증기양생을 하였으며 탈형 후 실험체의 충전불량은 발생하지 않았다.

타설시 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더형 공시체를 제작하여 기둥 부재 실험과 동시에 압축강도를 시험한 결과 평균 35.2MPa의 압축강도를 나타내었다. 실험체의 주철근은 A사의 D13 (126.7mm^2) 철근을 사용하였으며 횡보강근은 국내 K사에서 제작한 D6.1 (28.3mm^2) 철근을 사용하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 KS B 0802에 준하여 철근의 인장 시험을 실시한 결과 주철근은 항복강도 530MPa로 측정되었으며 횡보강근의 항복강도는 보통강도 439MPa와 고강도 1,028MPa로 측정되었다. 이에 따른 철근의 응력-변형률 곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험체 계획

이 연구에서는 나선철근 형태의 횡보강근과 고강도 횡보강근을 사용한 RC 기둥의 휨거동을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 8개의 캔틸레버형 기둥 실험체를 제작하였다. 실험체의 단면은 250×250 mm로 계획하였으며 실험체의 휨 파괴를 선행시키기 위하여 전단경간비를 4.1로 계획하였다. 실험체간의 높이는 670mm, 상부 스토퍼는 $250 \times 250 \times 400$ mm, 하부 스토퍼는 $600 \times 500 \times 450$ mm로 계획하였다. 실험의 주요 변수는 Fig. 2에 나타낸 바와

Table 1 Mix design of concrete

f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	FA/SF	S	G	AD
30	10	38.7	47.0	165	392	34	801	910	3.41

Table 2 Physical properties of reinforcement

Steel bar	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	Note
D13	530	650	152	Longitudinal reinforcement
D6.1	439	447	219	Transverse reinforcement
	1,028	1,078	190	

같이 띠철근 형태의 R-type과 나선철근으로 원형에 가까운 사각과 팔각형이 혼합된 O-type의 배근 형상을 주요 변수로 계획하였다.

횡보강근의 항복강도는 보통강도(439MPa)와 고강도(1,028MPa)로 계획하였다. 횡보강근량에 따른 RC 기둥의 연성 특성을 평가하기 위하여 횡보강근량을 2가지로 계획하되 R-type과 O-type의 철근량을 동일하게 계획하였다. 띠철근을 적용한 R-type과 나선철근을 적용한 O-type 실험체를 각각 4체씩 제작하였으며 실험체 상세

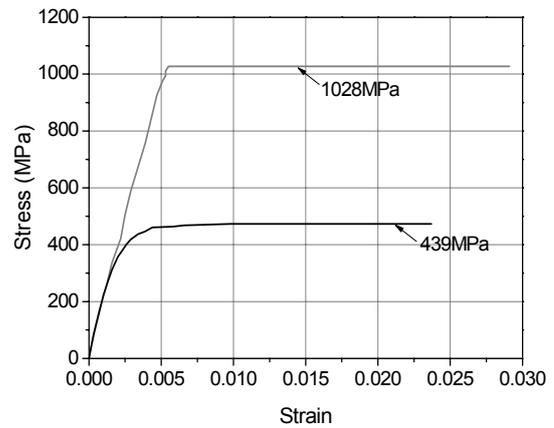


Fig. 1 Stress versus strain relationship of reinforcements

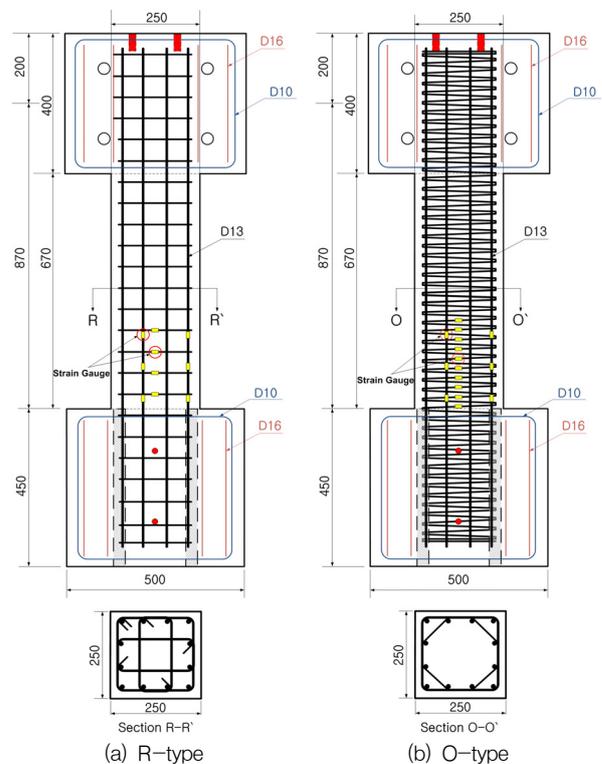


Fig. 2 Details of specimens

Table 3 Properties of specimens

Specimens	f_y (MPa)	Transverse reinforcement (D6)			Axial load ratio ($\frac{N}{bhf_{ck}}$)
		Type	f_{wy} (MPa)	S_h (mm)	
H-RN	530MPa	[Grid]	439	42.0	737
H-ON				38.0	745
H-RU		[Grid]	1,028	42.0	737
H-OU				38.0	745
M-RN		[Grid]	439	60.5	507
M-ON				54.5	510
M-RU		[Grid]	1,028	60.5	507
M-OU				54.5	510

는 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다. 실험체명에서 H와 M은 각각 횡보강근량(A_{sp})을, R과 O는 배근형상(띠철근 형태의 R-type, 나선철근 형태의 O-type), N과 U는 횡보강근의 항복강도(f_{wy} =439 MPa, 1,028MPa)를 의미한다.

실험체의 소성힌지 구간에서 주철근의 변형과 항복여부를 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 횡보강근의 변형을 측정하기 위하여 가력방향과 그에 수직인 방향에 스트레인 게이지를 Fig. 2와 같이 부착하였다.

2.3 실험 방법

실험은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 축방향에 250kN 용량의 액추에이터를 사용하여 축력비 10%에 맞추어 축력(218kN)을 일정하게 가력한 후 횡방향에 500kN 용량의 액추에이터를 사용하여 반복 횡하중을 가력하였다. 실험체의 횡방향 변위는 횡하중의 가력점 맞은편에 200mm의 LVDT를 설치하여 계측하였다. 횡하중은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 실험체의 주철근에 부착된 스트레인 게이지로부터 산정된 부재의 항복변위를 기준으로 각 하중 단계별로 2사이클씩 가력하였다. 실험은 횡하중이 최대하중의 약 80% 이하로 떨어지는 시점에서 종료하였다.

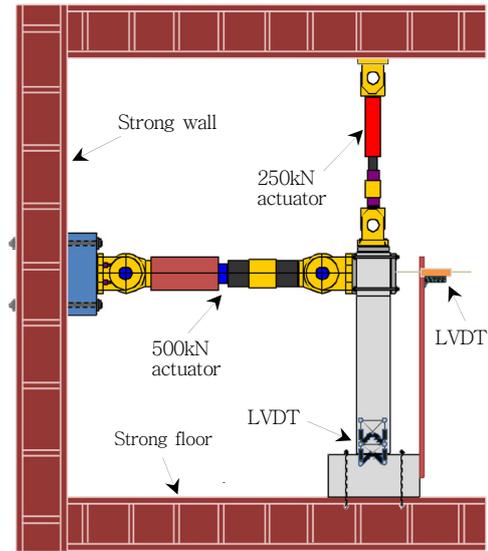


Fig. 3 Test setup of specimen

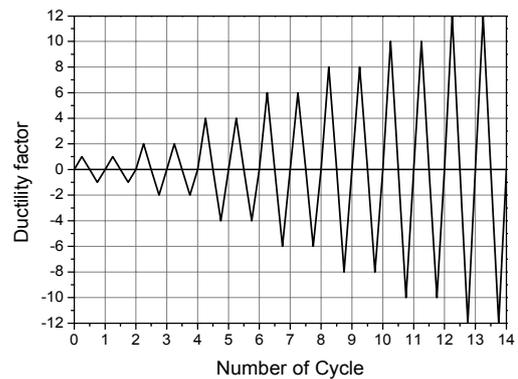


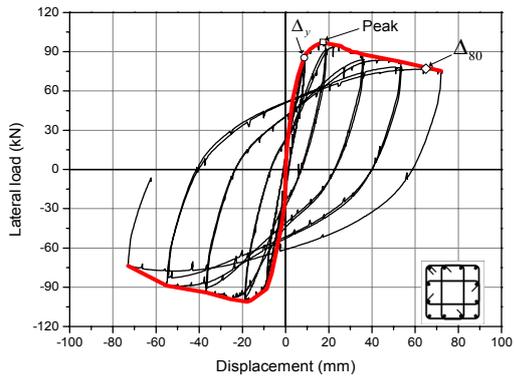
Fig. 4 Lateral loading history

3. 실험 결과

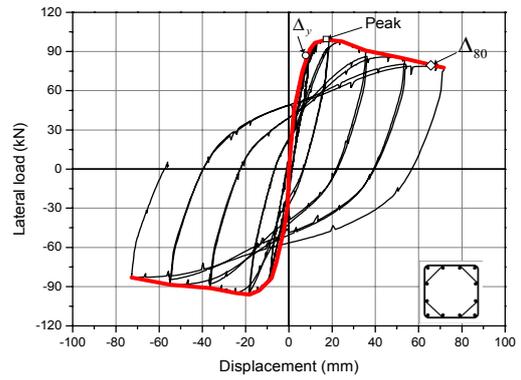
3.1 하중-변위 이력곡선

실험으로부터 구한 횡하중-변위 이력곡선을 각 실험체 별로 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 실험체의 최대하중은 M-OU를 제외한 모든 실험체에서 3사이클에서 나타났으며, M-OU 실험체는 5사이클에서 나타났다. 배근형상에 따른 최대하중의 차이는 약 4%내외로 유사하게 나타났다.

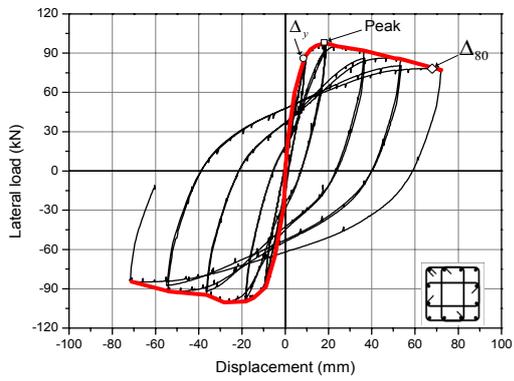
동일한 횡보강근량에서 실험체의 하중-이력특성은 나선철근 형상인 O-type 실험체와 띠철근 형상인 R-type이 유사하게 나타났다. 횡보강근량이 M에서 H로 증가한 실험체에서 보다 안정적인 파괴양상을 나타내었으며, Fig.



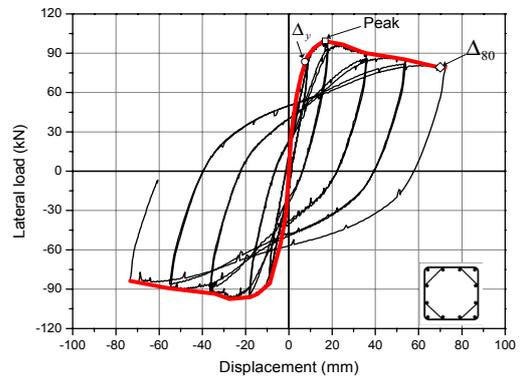
(a) H-RN



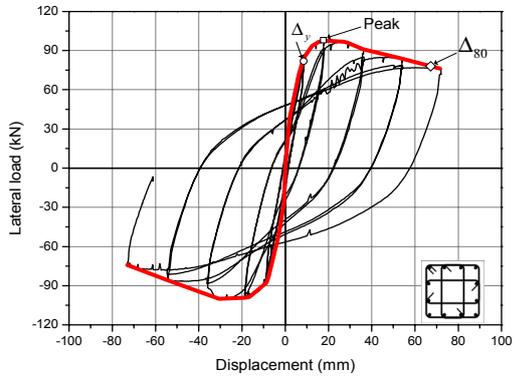
(b) H-ON



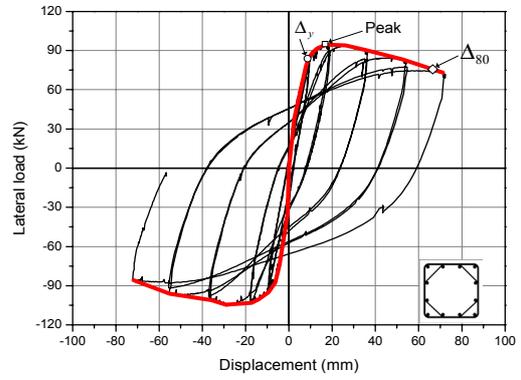
(c) H-RU



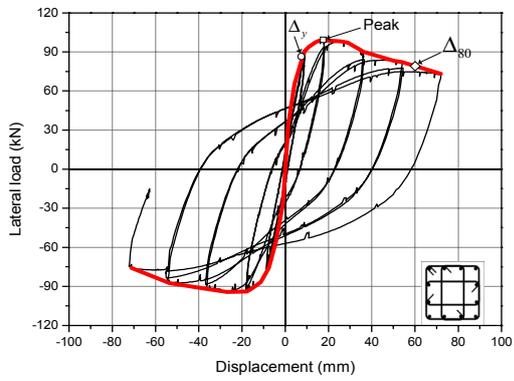
(d) H-OU



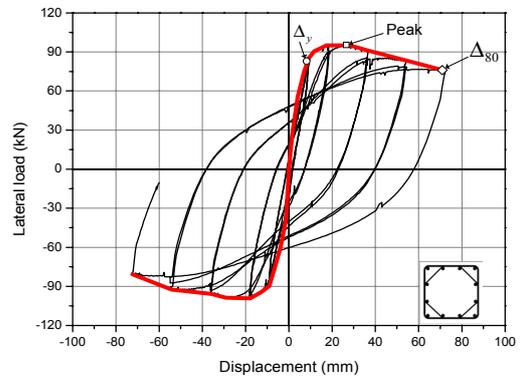
(e) M-RN



(f) M-ON



(g) M-RU



(h) M-OU

Fig. 5 Lateral load-displacement relationships of tested specimens

5에 나타난 바와 같이 실험체의 최대하중 이후의 포락선의 기울기가 완만한 것을 확인 할 수 있다. 또한 횡보강근의 항복강도가 보통강도인 N 시리즈 실험체에 비하여 횡보강근의 항복강도가 고강도인 U 시리즈 실험체에서 최대하중 이후 변형능력이 증가하였다.

3.2 실험체 파괴 양상

각 실험체의 최종 파괴 양상은 Photo 1에 나타내었다. 실험결과 모든 실험체의 소성힌지 영역에서 콘크리트 압괴와 피복콘크리트의 박리를 수반하는 전형적인 휨파괴 양상을 관찰할 수 있다. 또한 횡보강근 항복강도가 증가할수록 균열 발생 수가 증가하였으며, 횡보강근 배근형상이 O-type인 실험체가 R-type 실험체보다 많은 수의 균열이 발생하였다.

정방향(+)과 부방향(-) 모두 초기균열은 최대 휨모멘트 구역에서 발생하여 점차 실험체 중앙부로 진전되다가 경사균열로 발전하였다. 또한 8사이클 이후부터 피복콘크리트의 탈락이 발생하여 하중이 저하되었으며, 10사이클 이후 코어콘크리트의 파괴와 함께 주철근의 좌굴을 확인하였다.

4. 실험 분석

4.1 실험체의 휨강도 비교

실험체의 강도 및 변형능력에 대한 실험 및 해석결과는 Table 4에서 비교하여 나타내었다. Table 4에서 실험체의 항복모멘트는 재료의 탄성해석을 통하여 힘의 평형조건과 후크의 법칙을 이용하여 계산하였다. 실험체의 최대모멘트는 콘크리트구조설계기준(Korea Concrete Institute, 2007)에 근거한 다음 식 (1)로부터 산정하였다.

$$M_{u,ana} = 0.85f_{ck}ab\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) + \sum_{i=1}^n N_{si}\left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad (1)$$

여기서 f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, a 는 등가응력블럭의 깊이, b 는 기둥단면의 폭, h 는 기둥 단면의 높이, N_{si} 는 여러 단으로 배근된 철근이 각각 받는 힘, d_i 는 압축콘크리트 연단으로부터 i 열 철근 중심까지의 거리이다.

실험체의 항복모멘트에 대한 실험결과와 해석결과의

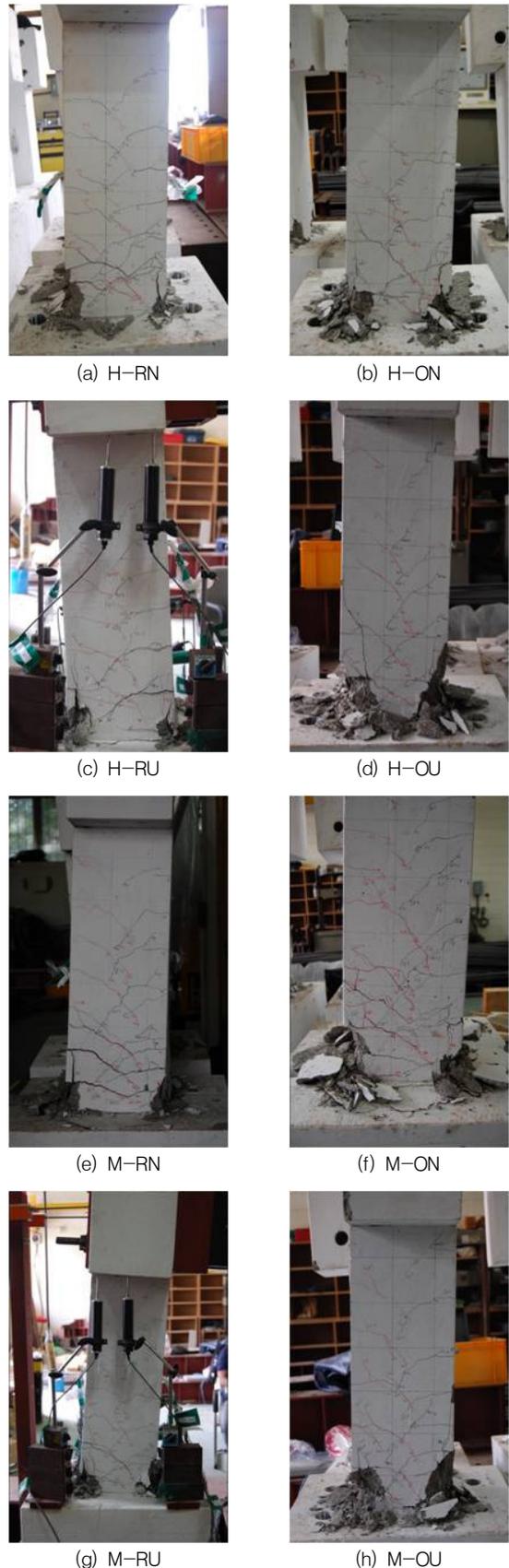


Photo 1 Crack patterns of specimens

Table 4 Experimental and analytical results of tested specimens

Specimen	Yield load (kN)	Peak load (kN)	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)	$\frac{M_{y,exp}}{M_{y,ana}}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{u,ana}}$	Δ_y (mm)	Δ_{80} (mm)	Δ_μ	Energy dissipation (kN-mm)
H-RN	81.9	97.1	71.3	84.6	0.90	1.01	8.1	63.8	7.87	39,000
H-ON	86.6	99.2	75.4	86.4	0.95	1.04	8.1	65.7	8.12	39,000
H-RU	85.6	97.8	74.6	85.2	0.94	1.02	8.7	68.0	7.78	40,500
H-OU	83.2	99.1	72.5	86.3	0.91	1.03	7.7	70.0	9.08	39,500
M-RN	81.5	97.6	71.0	85.0	0.89	1.02	8.8	67.3	7.69	38,200
M-ON	83.5	94.5	72.7	82.3	0.92	0.99	8.9	66.6	7.46	39,300
M-RU	86.1	98.8	75.0	86.1	0.94	1.03	7.7	60.1	7.79	38,000
M-OU	82.4	95.1	71.8	82.8	0.90	0.99	8.5	71.0	8.34	39,500

비는 0.89~0.95 사이로 나타났으며, 평균 0.92, 변동계수 2%로 실험결과와 해석결과의 오차는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 최대 모멘트의 실험결과와 해석결과의 비는 0.99~1.04 사이에 분포하였으며 평균 1.04, 변동계수 2%로 해석결과가 실험결과를 비교적 잘 예측하였다.

4.2 횡보강근 배근형상에 따른 연성

횡보강근의 배근형태를 변수로한 실험체의 연성지수를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 이 연구에서는 연성지수를 정방향 가력을 기준으로 산정하여 횡보강근의 배근형상과 횡보강근량에 따른 RC 기둥의 연성능력을 비교하였다. 여기서 연성이란 부재가 최대하중 이후 하중의 큰 저하없이 변형할 수 있는 능력을 의미한다. 이 연구에서는 여러 연구자들에 의하여 사용된 다음 식 (2)를 이용하여 연성을 산정하였다(Kim et al., 2009).

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_{80}}{\Delta_y} \quad (2)$$

여기서 Δ_{80} 은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 하중-변위 이력곡선에서 최대하중 이후 최대하중의 80%에 해당하는 극한시 변위, Δ_y 는 최대하중의 75%에 접선과 최대하중이 교차하는 지점에 해당하는 항복시 변위이다. 이 연구에서 항복하중은 Δ_y 에서의 하중-변위 이력곡선상의 값으로 사용하였다.

횡보강근량이 상대적으로 높은 H 시리즈 실험체의 경우, 횡보강근 배근형태가 비교적 원형에 가까운 나선철근 O-type 실험체가 기존의 띠철근을 사용한 R-type 실험체에 비하여 연성지수가 최대 약 15% 이상 증진되었음을

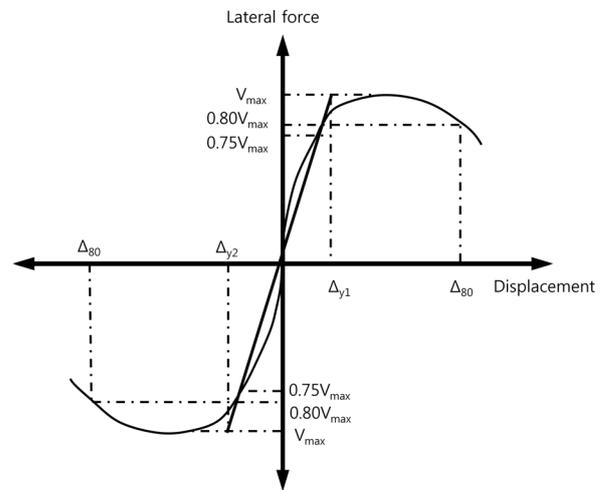


Fig. 6 Definition of ductility

알 수 있다. 또한 횡보강근량이 상대적으로 낮은 M 시리즈 실험체의 경우 횡보강근 항복강도가 증가할수록 배근형태가 원형에 가까운 O-type 실험체의 연성능력이 R-type에 비하여 최대 약 7% 높은 연성지수를 나타내었다. 이는 횡보강근 배근형상이 O-type인 실험체가 기존의 띠철근인 R-type에 비하여 배근형상이 원형에 가까이 효과적인 횡구속 능력을 발휘하였기 때문으로 판단된다.

4.3 횡보강근 항복강도에 따른 연성

실험체에 적용된 횡보강근의 항복강도가 기둥의 연성에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 기존의 띠철근을 적용한 R-type 실험체의 경우 횡보강근량에 관계없이 횡보강근의 항복강도 증가에 따른 연성증진은 거의 없음을 알 수 있었다. 이는 실험체의 횡보강근 변형률과 횡변

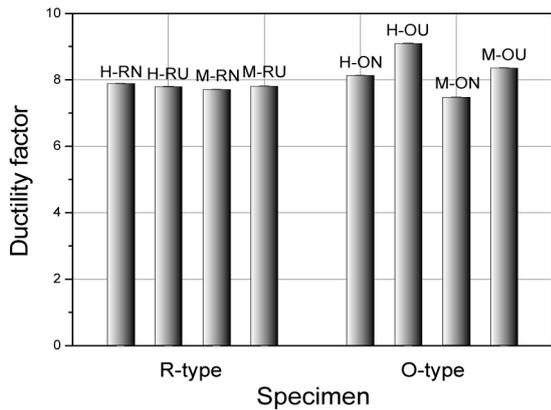
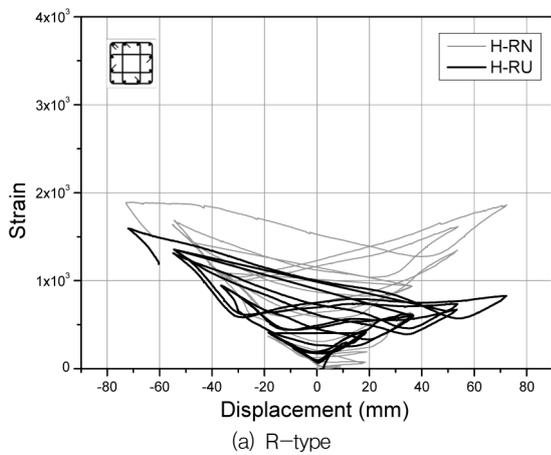
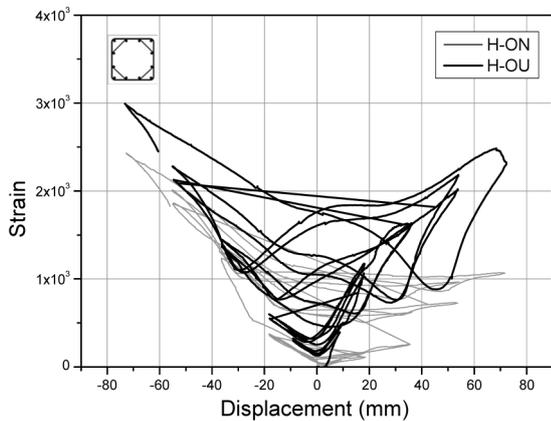


Fig. 7 Ductility factor of specimens



(a) R-type



(b) O-type

Fig. 8 Strain of transverse reinforcements

위 관계를 나타낸 Fig. 8(a)에서도 확인 할 수 있다. 즉, 기존 띠철근인 R-type의 경우 횡보강근의 항복강도가 439MPa에서 1,028MPa로 증가하더라도 고강도 횡보강근의 변형률이 비교적 낮아 횡구속 측면에서 효과적이지 못하였음을 알 수 있다. 이에 반하여 나선철근을 적용한

O-type의 경우는 횡보강근량에 관계없이 횡보강근의 항복강도가 439MPa에서 1,028MPa로 증가함에 따라 약 10%의 연성증진 효과를 나타내었다. 이는 Fig. 8(b)에서 확인 할 수 있듯이 O-type 실험체의 횡보강근의 항복강도가 증가함에 따라 횡보강근의 변형률 또한 증가하는 것으로부터 고강도 횡보강근이 보다 효과적으로 코어콘크리트를 횡구속 한다는 것을 알 수 있다.

4.4 횡보강근량에 따른 연성

횡보강근량에 따른 연성지수는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 띠철근을 적용한 R-type 실험체의 경우, 횡보강근의 항복강도에 관계없이 횡보강근량의 증가에 따른 연성증진은 약 2%로 미미하였다. 이에 반하여 나선철근인 O-type 실험체의 경우 횡보강근량이 증가하였을 경우 횡보강근 항복강도에 관계없이 약 8%의 연성증진 효과를 나타내었다. 이는 제안된 O-type의 배근형상이 코어콘크리트를 효과적으로 구속할 수 있는 형태를 가졌기 때문으로 판단된다.

4.5 에너지 소산능력 평가

에너지 소산능력은 철근콘크리트 기둥의 변형 성능을 평가하는데 있어 연성능력과 함께 매우 중요하다. 따라서 이 연구에서는 Table 4에 나타난 바와 같이 에너지 소산능력을 실험체의 하중-변위 이력곡선의 면적의 총합을 누적하여 나타내었다(Eom et al., 2002).

횡보강근 배근형태에 따라 기존 띠철근인 R-type 실험체는 횡보강근 항복강도에 관계없이 횡보강근량이 H에서 M으로 낮아짐에 따라 에너지 소산능력은 약 7% 저하하였다. 이에 반하여 배근형태가 나선철근인 O-type 실험체는 횡보강근 항복강도에 관계 없이 횡보강근량이 H에서 M으로 낮아짐에도 불구하고 에너지 소산능력의 저하가 나타나지 않았다. 이는 횡보강근 배근형상이 원형에 가까운 O-type 실험체가 낮은 횡보강근 철근량에서도 R-type 실험체에 비하여 효과적으로 코어콘크리트를 횡구속 하였음을 뜻한다.

5. 결론

축력과 반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 실험

결과로부터 횡보강근의 배근형상과 횡보강근 항복강도, 횡보강근량에 따른 거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이 연구에서 제안된 배근형상을 가지는 O-type 실험체는 횡보강근의 항복강도가 보통강도에서 고강도로 증가함에 따라 기존 띠철근인 R-type 실험체에 비하여 높은 연성능력을 나타내었다. 이는 제안된 O-type의 배근형상이 R-type에 비하여 원형에 가까워 효과적인 횡구속이 가능하였기 때문으로 판단된다.
- (2) 원형에 가깝게 제안한 O-type 배근형상은 횡보강근량이 증가함에 따라 연성증진 효과를 보인 반면, 기존 띠철근인 R-type 실험체는 연성증진효과가 미미하였다.
- (3) 기존 띠철근으로 횡보강된 R-type 실험체는 H에서 M으로 횡보강근량이 감소함에 따라 에너지 소산능력이 감소한 반면, 제안된 배근형상을 가지는 O-type 실험체는 동등 이상의 에너지 소산능력을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012-0001764)과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2012-0006682)으로 수행된

연구입니다. 또한, 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2012R1A1A2039067)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jong-Kuen kim, Byum-Seok Han and Sung-Woo Shin, "Ductility Capacity of Ultra-High Strength R/C Tied Columns Considering the Axial Load Ratio and Configuration of Transverse Reinforcement", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, vol. 25, No. 1, 2009. pp.3-11.
2. Koji Sakai and Sharmin A. Sheikh, "What Do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Columns?" ACI Structural Journal, vol. 86, No. 2, 1989, pp.192-207.
3. Korea Concrete Institute, "Concrete Design Code", Korea Concrete Institute, 2007, p.327.
4. Samuel Yen-Liang Yin, Tzu-Liang Wu, Tony C. Liu, Shamim A. Sheikh and Raymond Wang, "Interlocking Spiral Confinement for Rectangular Columns", Concrete International, American Concrete Institute, vol. 33, No. 12, 2011, pp.38-45.
5. Sharmin A. Sheikh and Shafik S. Khoury, "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", ACI Structural Journal, vol. 94, No. 4, 1997, pp.421-431.
6. Tae-Sung Eom and Hong-Gun Park, "Equations for Estimation Energy Dissipation Capacity of Flexure-Dominated RS Members", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 14, No. 6, 2002, pp.989-1000.

Received : 03/28/2012

Revised : 07/24/2012

Accepted : 08/03/2012

요 지

이 연구에서는 횡보강근의 배근형상에 따른 철근콘크리트 기둥의 휨 연성을 평가하였다. 이를 위하여 총 8체의 철근콘크리트 기둥 실험체를 휨 실험하였다. 실험변수는 횡보강근의 배근형상과 항복강도 및 횡보강근량으로 하였다. 실험체는 250×250mm 단면을 가지도록 계획하였으며, 휨 파괴를 유도하기 위하여 전단경간비를 4.1로 계획하였다. 이 실험에서는 일정한 축하중과 함께 반복 횡하중을 실험체에 가력하였다. 실험결과, 제안된 횡보강근 배근형상을 가지는 실험체가 기존 띠철근을 가지는 실험체보다 더 높은 연성과 에너지 소산 능력을 나타냄을 확인할 수 있었다.

핵심 용어 : RC기둥, 연성, 배근형상, 횡보강근, 고강도 철근