나선철근 간격에 따른 원형 RC 기둥의 변위연성도

Displacement Ductility of Circular RC Column According to the Spacing of Spirals

고 성 현^{1)*}

Ko, Seong Hyun

Abstract

Eight small scale circular reinforced concrete columns (4.5 aspect ratio) were tested under cyclic lateral load with constant axial load. The selected test variables are longitudinal steel ratio (2.017%, 3.161%), transverse steel ratio, and axial load ratio (0, 0.07, 0.15). Volumetric ratio of spirals of all the columns is 0.335~0.894% in the plastic hinge region. It corresponds to 39.7~122.3% of the minimum requirement of confining steel by Korean Bridge Design Specifications, which represent existing columns not designed by the current seismic design specifications or designed by seismic concept. The final objectives of this study are to provide quantitative reference data and tendency for performance or damage assessment based on the performance levels such as cracking, yielding, steel fracture, etc. In this paper, describes mainly failure behavior, strength degradation behaviour, displacement ductility of circular reinforced concrete bridge columns with respect to test variables.

Keywords : Aspect ratio, Transverse steel ratio, Longitudinal steel ratio, Strength degradation, Displacement ductility

1. 서 론

1992년 내진설계가 도입됨에 따라 소성힌지 개념이 도입되어 횡방향 철근에 대한 규정이 제정되기 이전의 도로교표준시방서에서는 후프띠철근 상세는 철근 지름은 D13 이상, 철근간격은 300mm 이하, 지름의 1/2 이하, $12d_b$ 중 작은 값을 사용하도록 규정되었다. Chung et al.의 연구에 따르면 고속도로상의 비내진 설계된 교각에 대하여 제원과 띠철근 형태 등을 조사한 결과 일반적으로 교각의 띠철근은 직경 D13 또는 D16으로 200~300mm의 간격으로 배근되어 0.1~0.16%의 체적비를 갖는 것으로 보고되었다. 국내의 철근콘크리트 교각은 다양한 형상비 및 배근상세를 가지고 있으므로 지진에 의한 파괴유형과 내진성능은 다양하게 나타나리라 판단된다. 따라서, 기존교각의 내진보강 방안을 마련하기 위한 충분한 기초자료가 미흡한 실정이다. 그러므로 국내에 많이 건설된 형식의 교각들에 대해서 시공 당시의 설계상세 및 시

공상세를 고려하여 실험을 통해 다양한 조건에 따라 내진성능을 평가하고 연구결과를 축적해 나가는 것이 절실하다. 지진에 의한 과도한 변형에 저항하여 철근콘크리트 교각의 붕괴를 방지하려면 충분한 연성능력이 필요하다. 이러한 연성능력은 철근콘크리트 교각의 현저한 내력이나 강성저하 없이 소성적으로 변형할 수 있는 능력이다.

일반적으로 이러한 교각의 연성능력은 항복변위에 대한 극한변위의 비로 정의되는 변위연성도 (displacement ductility factor, $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$)로 나타낸다. 그러나 항복변위의 정의에 따라 변위연성도의 정량적인 값이 크게 달라진다. 즉, 항복변위에 대한 정의 역시 단면 및 부재를 구성하고 있는 다양한 변수들에 의해 영향을 받으며, 몇 가지의 방법이 제안되어 있으나 현재까지 통일된 기준이 정립되지 않은 실정이다. 극한변위에 대한 정의 역시 파괴유형, 하중-변위 관계, 파괴되는 재료 등에 따라 다르게 결정되며 통일된 기준이 정립되지 않은 실정이다. 이렇게 결정된 변위연성도는 주기와

1) 정희원, 제주국제대학교 토목공학과 조교수, 교신저자

* Corresponding author : kosh@jeju.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

함께 응답수정계수, R에도 직접적 영향을 미치게 된다.

본 연구는 실험결과를 통해 분석된 실험변수에 따른 실험적 기초자료의 제공과 함께 하중단계별 균열거동, 철근의 항복, 파단 등 정량적 수치와 경향을 제공하고 변위연성도 결정방법에 대한 논의를 위한 것이다.

2. 실험체 및 재하실험

2.1 실험체 제작

지름 400mm의 원형단면 기둥 실험체 8개를 제작하였다. 실험체 중 일부를 Fig. 1에 나타내었다. 8개 실험체의 전체 높이는 2,600mm, 기둥길이 2,000mm, 기초상면부터 하중재하 높이까지의 형상비는 4.5이다. 기초의 높이는 600mm로 기초의 균열, 파괴 등이 교각의 거동에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 충분한 강도를 갖도록 설계하였다. 실험체는 축방향철근의 중심에서 콘크리트 표면까지의 거리는 30.4mm로서 축방향철근 공칭지름 (d_{bl})의 2.39배이고 횡방향철근의 외측표면에서 콘크리트 표면까지의 피복두께는 18mm이다. 모든 실험체의 횡방향철근으로 나선철근이 배근되었다.

Fig. 1 Configurations and dimensions of specimens

2.2 실험변수

Table 1은 실험체 상세를 정리하여 나타낸 것으로 축방향 철근비, 심부구속철근비, 축력비를 주요 실험변수로 결정하였다. CSP1~2, CSP4~5 실험체는 축방향철근비가 2.017%로 SD40의 D13 철근 20개가 축방향철근으로 배근되었다. CSP3 실험체는 축방향철근비가 2.017%로 SD30의 D13 철근 20개가 축방향철근으로 배근되었다. CSP6~8 실험체는 SD40의 D16 철근 20개가 축방향철근으로 배근되었고 축방향철근비는 3.161%이다. CSP2~5 실험체는 160mm 간격으로 횡방향철근이 배근되었고 CSP1 실험체는 120mm 간격으로 배근되었다. CSP7 실험체는 105mm 간격으로 배근되었으며 CSP6 실험체는 80mm, CSP8 실험체는 60mm로 배근되었다. 횡철근 간격이 160mm인 경우는 심부구속철근비가 0.3352%, 120mm인 경우는 0.4469%, 105mm인 경우는 0.5108%, 80mm인 경우는 0.6704%, 60mm인 경우는 0.8938%이다.

2.3 횡방향철근

횡방향철근은 축방향철근 공칭단면적과의 비율을 고려하여 SD40의 D10 철근을 밀링머신을 이용하여 축선방향의 리브(rib)는 남겨지고 단면 폭이 6.05mm되도록 가공하였으며 가공된 횡방향철근의 철근리브와 마디를 제외한 단면적은 47.73mm^2 이다. 횡방향철근과 D13 축방향철근의 단면적 비율은 0.377이고 D16 축방향철근과의 비율은 0.24이다.

횡방향철근은 참고문헌 4 (Ko, 2012)와 동일하게 가공되었고 동일한 실험방법 및 실험실에서 수행되었다. 따라서 Fig. 2(a), Fig. 3(b), Fig. 5는 참고문헌 4 (Ko, 2012)의 그림과 동일하다.

Table 1 Test column details and material properties

Specimens	Longitudinal steel			Confinement steel			Axial load ratio $\frac{P}{f_{cu} A_g}$
	Bar size	Yield strength [MPa]	ρ_t (%)	ρ_s (%)	Spacing [mm]	Yield strength [MPa]	
CSP1	D13	482	2.017	0.4469	120	421	0.07
CSP2	D13	482	2.017	0.3352	160	421	0.07
CSP3	D13	381	2.017	0.3352	160	421	0.07
CSP4	D13	482	2.017	0.3352	160	421	0.0
CSP5	D13	482	2.017	0.3352	160	421	0.15
CSP6	D16	482	3.161	0.6704	80	421	0.07
CSP7	D16	482	3.161	0.5108	105	421	0.07
CSP8	D16	482	3.161	0.8938	60	421	0.07

2.4 도로교설계기준과의 비교

Table 2에 모든 실험체에 배근된 나선철근 간격에 따라 완전연성을 보장하기 위해 도로교설계기준에서 요구하는 심부 구속철근비 (Eq. 1, Eq. 2)와 나선철근 간격을 나타내었다. 또한, 축방향철근의 좌굴을 방지하기 위한 축방향철근 지름의 6배 규정에 따른 횡철근 간격을 나타내었다. 각 실험체에 배근된 횡방향철근 간격은 완전연성을 보장하기 위한 도로교설계기준의 심부구속철근비의 0.397~1.223배 범위이다.

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (1)$$

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (2)$$

2.5 철근 인장강도 및 콘크리트 압축강도 시험

실험체 제작에 사용된 철근의 재료특성 파악을 위해 KS B 0801 및 0802규정에 따라 횡방향철근의 경우 3편, 축방향철근의 경우 3편에 대하여 Fig. 2와 같이 철근 인장시험을 수행하여 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 항복강도는 횡방향철근의 경우 421MPa, SD300 축방향철근의 경우 381MPa, SD400

축방향철근의 경우 482MPa로 계측되었다. 콘크리트의 압축강도 (f_{cu})는 25MPa로 계측되었다.

3. 횡하중 반복재하실험

재하실험은 Fig. 4와 같이 유압잭을 이용하여 축력을 가한 상태에서 변위용량이 $\pm 150\text{mm}$ 인 500kN Hydraulic actuator를 이용하여 횡방향 하중을 반복 가력하는 준정적 실험을 수행하였다. 축력비는 교각에 작용하는 고정하중과 축력재하장비의 용량을 고려하여 0, 0.07, 0.15로 결정하여 축력을 재하하였다. 하중재하방식은 Fig. 5와 같은 변위제어방식으로서 변위비를 첫 번째 하중은 0.25%로 하고 그 이후 0.5%씩 증가시키며 각각의 변위마다 2 cycle씩 반복 재하 하였다. 변위비 3.0% 이후에는 1%씩 증가시키며 파괴에 이를 때까지 실험하였다. 변위비는 횡변위에 대한 기둥길이의 비이다.

Fig. 2 Material test

Fig. 3 Stress-strain curves of reinforcement

Fig. 4 Photograph of test setup

Table 2 Comparison of parameters for spirals spacing

Specimens	CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
Spacing (mm)	120	160	160	160	160	80	105	60
Eq. 1 ρ_s (%)	0.652	0.652	0.823	0.652	0.652	0.652	0.652	0.652
Eq. 2 ρ_s (%)	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713
Eq. 1 s (mm)	80.23	80.23	63.56	80.23	80.23	80.23	80.23	80.23
Eq. 2 s (mm)	73.4	73.4	73.4	73.4	73.4	73.4	73.4	73.4
$6d_{bl}$ (mm)	76.2	76.2	76.2	76.2	76.2	95.4	95.4	95.4
$s_{min,KDSHB}$ (mm)	73.4	73.4	63.56	73.4	73.4	73.4	73.4	73.4
s (Eq. 1)/spacing	0.669	0.501	0.397	0.501	0.501	1.003	0.764	1.337
s (Eq. 2)/spacing	0.612	0.459	0.459	0.459	0.459	0.918	0.699	1.223
$6d_{bl}$ /spacing	0.635	0.476	0.476	0.476	0.476	1.193	0.909	1.590
$s_{min,KDSHB}$ /spacing	0.612	0.459	0.397	0.459	0.459	0.918	0.699	1.223

Fig. 5 History of displacement

4. 균열 및 파괴거동

Fig. 6에는 각 실험체의 최종 하중단계를 나타내고 있다. CSP1 실험체는 소성힌지구간에 초기균열이 0.25% 변위비에서 발생된 이후 0.5% 변위비에서 휨균열이 발생되었고 변위증가에 따라 휨균열이 높이 750mm까지 발생 및 진전되었으며 변위비 1.0% 단계에서 경사균열이 나타났다. 1.5% 변위비에서 소성힌지구간의 경사균열이 S2, S4면에서 교차되었다. 2.0% 변위비에서 경사균열이 45°로 진전되었다. 변위비 3.0% 단계에서 하중재하방향 면 (S1, S3)의 기초상단에서 100mm까지 박리가 관찰되었다. 변위비 4.0% 단계에서 기초상단부터 200mm 구간에 축방향철근 좌굴과 피복탈락이 관찰되었다.

6% 변위비에서 저주파피로에 의한 축방향철근이 6개 파단되었다. 기둥부재 내에 배근된 축방향철근은 반복되는 축방향철근의 영향으로 소성범위의 인장과 압축을 번갈아 받

게 되며 저주파 피로에 의한 철근의 파단은 단조인장 시험에 의한 파단점보다 감소된 변형률단계에서 파단된다. 대표적인 하중-변위 이력곡선으로서 CSP1의 계측결과를 Fig. 7에 나타내었다.

CSP2, CSP3 실험체는 CSP1 실험체와 휨균열, 경사균열, 축방향철근 좌굴과 피복콘크리트 탈락 거동이 동일한 변위비에서 발생하는 현상을 보였다. 다만 CSP1 및 CSP3 실험체는 3% 변위비에서 최대하중이 계측되었으나 CSP2 실험체는 2% 변위비에서 최대하중이 계측되었다.

CSP2 실험체는 변위비 4.0% 단계에서 기초상단부터 300mm 구간에 축방향철근 좌굴과 피복탈락이 관찰되었으며 균열폭이 최대 2mm로 계측되었다. 6% 변위비에서 저주파피로에 의한 축방향철근이 4개 파단되었다.

CSP3 실험체는 변위비 4.0% 단계에서 기초상단부터 200mm 구간에 축방향철근 좌굴과 피복탈락이 관찰되었으며 균열폭이 최대 3mm로 계측되었다. 6% 변위비에서 소성힌지부의 피복이 완전히 탈락되었으며 저주파피로에 의한 축방향철근

Fig. 7 Hysteresis loops of CSP1

Fig. 6 Column failure

이 4개 파단되었다.

CSP4 및 CSP5 실험체는 CSP1, CSP2, CSP3 실험체와 유사한 휨균열과 초기 경사균열 거동을 보였다. 1.5% 변위비에서 소성힌지구간의 경사균열이 S2, S4면에서 교차되었고 경사균열이 45°로 진전되었다. 2.0% 변위비에서 경사균열이 45°로 진전되었다. 하지만 CSP4 실험체는 변위비 3.0% 단계에서 최대하중과 피복박리가 발생하였으나 CSP5 실험체는 2.5% 변위비에서 최대하중과 피복박리가 계속되었다. 변위비 4.0% 단계에서 CSP4 및 CSP5 실험체는 기초상단부터 200mm와 300mm 구간에 축방향철근 좌굴과 피복탈락이 관찰되었으며 균열폭이 최대 2mm와 1mm로 계속되었다. CSP4 및 CSP5 실험체는 6% 변위비에서 소성힌지부의 피복이 완전히 탈락되었으며 저주파피로에 의한 축방향철근이 각각 4개와 5개 파단되었다.

CSP6, CSP7, CSP8 실험체는 0.5% 변위비에서 소성힌지구간에 휨균열이 발생하였고 변위비 1.5% 단계에서 축방향철근이 항복하였으며 소성힌지부에 경사균열이 나타났고 변위비가 증가됨에 따라 심화되어 S2, S4면에서 교차되었다. CSP6, CSP7 실험체는 2.0% 변위비에서 경사균열이 45°로 발생 및 진전되었고 CSP8 실험체는 2.5% 변위비에서 경사균열이 45°로 발생 및 진전되었다. CSP6, CSP7 실험체는 4.0% 변위비, CSP8 실험체는 5.0% 변위비에서 최대하중이 계속되었다. CSP6, CSP7 실험체는 5.0% 변위비, CSP8 실험체는 6.0% 변위비에서 축방향철근의 좌굴과 피복탈락이 관찰되었다.

CSP6, CSP7, CSP8 실험체는 균열폭이 최대 1mm로 계속되었고 CSP7 실험체만 축방향철근이 3개 파단되었다. CSP6, CSP7 및 CSP8 실험체는 초기 경사균열 발생과 축방향철근의 좌굴 시점이 CSP1~5 실험체들보다 0.5~1.0% 변위비 늦게 발생되었는데 이는 축방향철근량이 증가하여 축강성이 증가되었고 심부구속철근비가 증대되었기 때문으로 판단된다. Table 3에 각 실험체들의 균열거동, 축방향철근의 항복과 파단, 좌굴, 피복탈락, 등을 하중단계별로 정리하여 나타내었다.

5. 변위단계별 횡력강도 저감

8개 실험체의 하중단계별 강도저감 거동을 비교하기 위해 각 실험체의 하중-변위 이력곡선 (hysteresis loops)과 포락곡선 (envelop curves)을 토대로 동일한 변위비 단계에서 공칭강도를 기준으로 강도저감비율을 분석하여 Table 4에 나타

Table 3 Failure behavior according to drift level

Drift ratio (%)	Specimens							
	CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
0.25	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
0.5	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
1.0	★	★	★	★	★			
1.5				☆	★	★	★	★
2.0	☆	●	☆		☆	☆	☆	
2.5					●	▲		☆
3.0	●	▲	●	●				
4.0	■	■	■	■	■	●	●	▲
5.0						■	■	◇
6.0	♣	♣	♣	♣	♣			■
7.0							♣	

◆: initial crack, ◎: flexural crack,
◇: vertical crack, ★: yield of longitudinal steel,
●: Maximum lateral force, ▲: cover concrete spalling,
■: buckling of longitudinal steel,
♣: initial shear crack, ☆: 45° shear crack,
♣: fracture of longitudinal steel

내었다.

각 실험체의 하중단계별 횡력강도 실험값 V_{exp} 와 등가직사각형 응력블럭을 이용하여 계산된 공칭횡력강도 $V_{n,code}$ 의 비율이며, 비율이 1.0 이상인 경우를 음영으로 표시하였다. 본 실험에서는 동일한 변위에 대해 각각 2회씩 횡하중이 재하되었고 철근상세에 따라 두 번째 가력 (first cycle loading) 시의 횡하중 강도에 대한 첫 번째 가력 (second cycle loading) 시의 횡하중 강도를 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 수행한 강도저감거동에 대한 주요 변수별 분석내용은 다음과 같다.

5.1 변위단계별 횡력강도 및 최대횡력 강도

Table 4와 같이 축방향철근, 심부구속철근량, 축력비에 따라 변위증가에 따른 횡력강도 차이를 보인다. 횡력강도는 변위비 1.5 또는 2.0%를 기준으로 공칭횡력강도보다 크게 나타난다. 횡력강도 실험값 V_{exp} 의 최대값은 실험체의 상세 및 축력에 따라 다소간의 차이는 있지만 대략 2~4% 변위비 범위에서 발생하였으며, 첫 번째 가력시를 기준으로 공칭횡력강도 $V_{n,code}$ 의 1.02~1.46배의 횡력강도를 보였다. 최대 횡력강도 이후에는 변위증가에 따라 횡력강도가 서서히 감소하는데, Table 5에서 강도비율이 1.0 이상인 경우의 공칭 횡력강도 $V_{n,code}$ 를 유지하는 변위는 축방향철근량, 심부구속철근량, 축력비 등에 따라 다르다. 전반적으로 축방향철근량과 심부구속철근량이 높을수록 공칭횡력강도 $V_{n,code}$ 를

Table 4 The ratio of lateral force to nominal strength

Specimens	Specimens	$V_{exp} / V_{n,code} (= M_{exp} / M_n)$										
		0.25% dr.	0.5% dr.	1.0% dr.	1.5% dr.	2.0% dr.	2.5% dr.	3.0% dr.	4.0% dr.	5.0% dr.	6.0% dr.	7.0% dr.
CSP1	Push 1cycle	0.28	0.46	0.75	0.97	1.09	1.14	1.14	1.15	1.08	0.93	
	Push 2cycle	0.28	0.46	0.74	0.95	1.07	1.1	1.1	1.07	0.97	0.69	
	Pull 1cycle	0.3	0.49	0.78	1.01	1.11	1.14	1.13	1.12	1.03	0.77	
	Pull 2cycle	0.3	0.49	0.77	0.99	1.1	1.12	1.11	1.06	0.93	0.54	
CSP2	Push 1cycle	0.32	0.55	0.85	1.07	1.19	1.24	1.24	1.24	1.07	0.93	
	Push 2cycle	0.29	0.45	0.71	0.89	0.97	0.99	0.99	0.94	0.83	0.72	
	Pull 1cycle	0.33	0.55	0.83	1.05	1.17	1.19	1.19	1.11	0.95		
	Pull 2cycle	0.28	0.44	0.69	0.87	0.95	0.97	0.96	0.87	0.74		
CSP3	Push 1cycle	0.37	0.62	0.95	1.12	1.18	1.2	1.2	1.16	1.03	0.84	
	Push 2cycle	0.38	0.61	0.93	1.09	1.14	1.16	1.16	1.04	0.87		
	Pull 1cycle	0.39	0.6	0.91	1.04	1.09	1.11	1.11	1.14	0.94	0.85	
	Pull 2cycle	0.38	0.59	0.89	1.03	1.07	1.09	1.09	0.98	0.82		
CSP4	Push 1cycle	0.26	0.42	0.37	0.92	1.02	1.03	1.02	1.04	0.96	0.87	
	Push 2cycle	0.26	0.41	0.69	0.91	0.97	0.97	0.97	0.94	0.85	0.56	
	Pull 1cycle	0.28	0.44	0.73	0.92	0.99	1.0	1.0	0.97	0.94	0.86	
	Pull 2cycle	0.28	0.43	0.71	0.91	0.96	0.97	0.97	0.92	0.85	0.64	
CSP5	Push 1cycle	0.3	0.52	0.82	1.04	1.19	1.25	1.27	1.28	1.01	0.82	
	Push 2cycle	0.31	0.51	0.8	1.02	1.16	1.22	1.22	1.07	0.87	0.58	
	Pull 1cycle	0.31	0.51	0.8	1.02	1.14	1.18	1.17	1.07	0.88	0.66	
	Pull 2cycle	0.3	0.5	0.78	1.0	1.12	1.15	1.13	0.94	0.76	0.47	
CSP6	Push 1cycle	0.23	0.4	0.69	0.93	1.13	1.27	1.35	1.14	1.38	1.36	1.29
	Push 2cycle	0.23	0.4	0.68	0.91	1.11	1.25	1.32	1.33	1.32	1.29	1.18
	Pull 1cycle	0.26	0.45	0.77	1.03	1.23	1.33	1.38	1.41	1.43	1.44	1.33
	Pull 2cycle	0.26	0.45	0.75	1.01	1.2	1.31	1.35	1.38	1.4	1.39	1.16
CSP7	Push 1cycle	0.28	0.46	0.72	0.96	1.16	1.31	1.4	1.46	1.44	1.39	1.26
	Push 2cycle	0.29	0.45	0.71	0.94	1.14	1.29	1.36	1.37	1.36	1.3	1.12
	Pull 1cycle	0.28	0.46	0.75	1.0	1.2	1.31	1.35	1.38	1.38	1.39	1.31
	Pull 2cycle	0.27	0.45	0.73	0.98	1.17	1.28	1.32	1.34	1.35	1.33	0.93
CSP8	Push 1cycle	0.26	0.45	0.74	0.98	1.17	1.29	1.34	1.37	1.36	1.35	1.34
	Push 2cycle	0.27	0.45	0.72	0.95	1.15	1.26	1.3	1.3	1.3	1.29	1.25
	Pull 1cycle	0.31	0.5	0.8	1.05	1.24	1.35	1.38	1.41	1.42	1.43	1.45
	Pull 2cycle	0.31	0.49	0.78	1.03	1.21	1.32	1.35	1.37	1.38	1.39	1.39

Table 5 Yield displacement (mm) and drift ratio (%)

Class	Specimens							
	CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
Y1	18.0 (1.0)	18.0 (1.0)	18.0 (1.0)	18.0 (1.0)	27.0 (1.5)	27.0 (1.5)	27.0 (1.5)	27.0 (1.5)
Y2	18.16 (1.01)	15.77 (0.88)	13.50 (0.75)	16.47 (0.92)	17.58 (0.98)	25.38 (1.41)	22.19 (1.23)	21.51 (1.20)
Y3	27.82 (1.55)	26.06 (1.45)	22.41 (1.24)	26.47 (1.47)	28.40 (1.58)	41.13 (2.29)	40.17 (2.23)	38.02 (2.11)
Y4	28.67 (1.59)	26.73 (1.49)	21.33 (1.19)	26.47 (1.47)	29.47 (1.64)	40.27 (2.24)	40.27 (2.24)	38.0 (2.11)
Y5	23.93 (1.33)	23.73 (1.32)	16.8 (0.93)	23.6 (1.31)	21.47 (1.19)	24.4 (1.36)	30.93 (1.72)	29.6 (1.64)

유지하는 변위가 크고 감소폭도 미미하였다. 나선철근 간격이 120mm 또는 160mm인 CSP1~CSP5 실험체의 경우에는 최대횡하중 값 이후에 변위비 4~6%부터 횡력강도 (V_{exp})의 값이 공칭횡력강도 ($V_{n,code}$)보다 작게 나타났다. 나선철근 간격이 80mm, 105mm, 60mm인 CSP6, CSP7, CSP8 실험체의 경우에는 변위비 7%까지 횡력강도 (V_{exp})의 값이 공칭횡력강도 ($V_{n,code}$)보다 크게 나타났다.

5.2 축방향철근 항복강도

CSP2와 CSP3 실험체는 항복강도가 각각 482MPa, 381MPa

Fig. 8 Effect of yielding strength

Fig. 10 Effect of spiral space

Fig. 9 Effect of axial load ratio

인 축방향철근이 동일한 철근비로 배근되었다. Table 4 및 Fig. 8에 나타난 바와 같이 CSP2와 CSP3 실험체의 최대 횡력강도비가 각각 1.15, 1.24이고 두 번째 가력시의 횡하중 강도에 대한 첫 번째 가력시의 횡하중 강도 비교에서도 3% 변위비까지는 동일하나 4% 부터는 차이를 보이고 있다.

5.3 축력비

CSP4, CSP2와 CSP5 실험체는 축력비가 각각 0, 7, 15%로 채하되었으며 다른 변수들은 동일하게 적용되었다. Table 4 및 Fig. 9에 나타난 바와 같이 변위비 4%에서 최대 횡력강도를 나타내었고 그 이후부터 감소하였다. Fig. 9(b)의 횡하중 강도 비교에서 축력비가 0, 0.07인 경우는 5% 변위비 이후부터 감소하였으나 축력비가 0.15인 경우는 3% 변위비 이후부터 급격히 감소되었다.

5.4 나선철근 간격

CSP1, CSP2 실험체는 축방향철근비가 2.017%이고 CSP6, CSP7, CSP8 실험체는 3.161%로 Table 4 및 Fig. 10과 같이 횡력강도의 차이를 보이고 있다. Fig. 10(b)와 같이 나선철근 간격이 각각 120과 160mm인 CSP1, CSP2 실험체는 4% 변위비부터 강도저감이 급격히 나타났고 나선철근 간격이 80mm, 105mm, 60mm인 CSP6, CSP7, CSP8 실험체의 경우에는 6% 변위비 이후에 횡철근간격이 클수록 강도저감이 급격하게 나타났다.

6. 변위연성도

6.1 항복변위

항복변위는 단면 및 부재를 구성하고 있는 다양한 변수들에 의해 영향을 받으며, 축방향철근비의 차이, 축방향철근 슬립발생의 영향, 국부적인 강성차이에 따른 영향, 심부구속 철근량의 차이에 따른 영향 및 축력비 차이 등의 복합적인 요인으로 인해 항복변위 정의 (Fig. 11)에 따라 Table 5와 같이 다른 값을 나타내었다. Fig. 11은 현재 적용되는 항복변위 결정방법이고 5개 정의에 따른 항복변위를 Fig. 12에 나타내었다. Y2는 탄성영역에서의 초기강성을 사용한 등가탄소성시스템 (equivalent elasto-plastic system)에 근거하고 Y3은 동일한 에너지 흡수량에 근거하며 Y4, Y5는 균열에 의

Fig. 11 Definition of yielding displacement

Fig. 12 Yielding displacement and ultimate displacement

Fig. 13 Definition of ultimate displacement

한 강성저하를 고려한 할선강성 (secant stiffness)에 근거한다. 국내·외 연구에서 Y1과 Y4 정의가 주로 사용되고 있다.

6.2 극한변위

극한변위 결정방법을 Fig. 13에 나타내었고 각 실험체에 대한 극한변위를 Table 6과 Fig. 12에 나타내었다. 반복하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 경우, 극한변위에 대한 정의는

Table 6 Ultimate displacement (mm) and drift ratio (%)

Class	Specimens							
	CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
U1	32.85 (2.05)	33.83 (2.11)	29.47 (1.84)	36.36 (2.27)	41.15 (2.57)	21.95 (1.37)	34.85 (2.18)	33.52 (2.10)
U2	57.85 (3.62)	43.85 (2.74)	62.20 (3.89)	63.0 (3.94)	53.2 (3.33)	89.15 (5.57)	88.70 (5.54)	97.50 (6.09)
U3	99.71 (6.23)	90.16 (5.63)	90.16 (5.63)	108.0 (6.75)	72.11 (4.51)	125.8 (7.86)	125.1 (7.82)	124.1 (7.76)
U4	107.5 (6.72)	108.0 (6.75)	108.0 (6.75)	108.0 (6.75)	107.9 (6.74)	124.0 (7.75)	125.1 (7.82)	—
U5	92.25 (5.77)	75.80 (4.74)	87.0 (5.44)	86.0 (5.38)	81.0 (5.06)	—	—	—

철근상세, 공칭강도, 하중-변위 이력곡선, 하중-변위 포락곡선, 파괴유형 (강도감소, 심부구속 효과), 파괴되는 재료 (콘크리트 파괴, 축방향철근 파단, 횡방향철근 파단) 등에 따라 다르게 제안되었으며 통일된 기준이 정립되지 않은 실정이다. U1은 콘크리트 압축연단의 변형률에 대응되는 변위, U2는 하중변위 관계에서 최대하중의 변위, U3은 최대하중 이후 일정강도 이상 저감되는 변위, U4는 횡방향철근 또는 축방향철근의 파단이 발생하는 변위, U5는 하중변위 곡선상에서 공칭항력 (V_i)이 하중변위 곡선과 교차되는 변위를 극한변위로 각각 정의한다. 국내·외 연구에서 U3과 U4 정의가 주로 사용되고 있다.

기존의 극한변위 결정방법 중 일부는 단면 및 부재를 구성하고 있는 다양한 변수들에 따라 극한변위를 결정할 수 없는 경우도 있다. Fig. 13(c), (e)의 경우에 CSP8과 같이 축방향철근의 파단이 발생되지 않거나 항력저감이 발생되지 않으면 극한변위를 산정할 수 없다. 또한 Fig. 13(d)의 경우에 축방향철근 또는 횡방향철근이 발생되지 않으면 극한변위를 산정할 수 없다.

6.3 변위연성도

일반적으로 교각의 연성능력을 정량적으로 표현하는 방법이 항복변위에 대한 극한변위의 비로 정의되는 변위연성도 (displacement ductility factor, $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$)로 나타낸다. 6.1, 6.2절에 언급한 바와 같이 변위연성도는 항복변위 및 극한변위의 정의에 따라 변위연성도의 정량적인 값이 크게 달라진다.

실험을 통해 도출된 변위연성도 (μ_{Δ})를 기준으로 장주기 (long period) 구조물과 단주기 (short period) 구조물의 응답수정 계수를 Eq. 3과 Eq. 4를 사용하여 계산할 수 있다. 응답수정계수는 내진설계 (소성설계) 및 내진보강에 적용되는데 다양한 항복 변위와 극한변위의 결정에 따라서 이 값이 다르게 산정된다. 따라서 항복변위 및 극한변위의 산정은 소성설계 및 보강설계에 결정적 영향을 미치는 인자이므로 신중하게 산정되어야 한다.

$$R = \mu_{\Delta} \quad (3)$$

$$R = \sqrt{2\mu_{\Delta} - 1} \quad (4)$$

실험결과를 토대로 6.1, 6.2절에 언급한 항복변위 및 극한 변위의 정의에 따라 변위연성도의 값을 산정하여 Table 7에 나타내었다.

각 실험체의 항복변위와 극한변위에 대한 변위연성도를 Fig. 14에 나타내었다. CSP1 실험체의 경우, Y1 항복변위

Table 7 Displacement ductility

Class		Specimens							
		CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
Y1	U1	1.83	1.88	1.64	2.02	1.15	1.27	1.29	1.24
	U2	3.21	2.44	3.46	3.5	1.97	3.3	3.29	3.61
	U3	5.51	5.01	5.01	6.0	2.67	4.66	4.63	4.58
	U4	6.0	6.0	6.0	6.0	4.0	4.63	4.63	—
	U5	5.11	4.21	4.83	4.78	3.0	—	—	—
Y2	U1	1.81	2.14	2.18	2.21	1.77	1.35	1.57	1.56
	U2	3.19	2.78	4.61	3.82	3.03	3.51	4.0	4.53
	U3	5.46	5.72	6.68	6.56	4.1	4.96	5.64	5.73
	U4	5.95	6.85	8.0	6.56	6.14	4.93	5.64	—
	U5	5.07	4.81	6.44	5.22	4.61	—	—	—
Y3	U1	1.18	1.3	1.32	1.37	1.1	0.83	0.87	0.88
	U2	2.08	1.68	2.78	2.38	1.87	2.17	2.21	2.56
	U3	3.57	3.46	4.02	4.08	2.54	3.06	3.11	3.25
	U4	3.88	4.14	4.82	4.08	3.8	3.04	3.11	—
	U5	3.31	2.91	3.88	3.25	2.85	—	—	—
Y4	U1	1.15	1.27	1.38	1.37	1.06	0.85	0.87	0.88
	U2	3.02	1.64	2.92	2.38	1.81	2.21	2.2	2.57
	U3	3.46	3.37	4.23	4.08	2.45	3.12	3.11	3.25
	U4	3.77	4.04	5.06	4.08	3.66	3.1	3.11	—
	U5	3.21	2.84	4.08	3.25	2.75	—	—	—
Y5	U1	1.37	1.43	1.75	1.54	1.45	1.4	1.13	1.13
	U2	2.42	1.85	3.7	2.67	2.48	3.65	2.87	3.29
	U3	4.15	3.8	5.37	4.58	3.36	5.16	4.04	4.18
	U4	4.51	4.55	6.43	4.58	5.03	5.12	4.04	—
	U5	3.84	3.19	5.18	3.64	3.77	—	—	—

Fig. 14 Displacement ductility

Table 8 Statistical parameters for displacement ductility

Class		Specimens							
		CSP1	CSP2	CSP3	CSP4	CSP5	CSP6	CSP7	CSP8
Y1	M	4.33	3.91	4.19	4.46	2.56	3.46	3.46	3.14
	S	1.75	1.73	1.69	1.71	1.07	1.6	1.58	1.72
	C	0.405	0.443	0.403	0.384	0.419	0.461	0.456	0.546
Y2	M	4.29	4.46	5.58	4.87	3.93	3.69	4.21	3.94
	S	1.74	1.97	2.25	1.87	1.65	1.7	1.92	2.15
	C	0.405	0.443	0.403	0.384	0.419	0.461	0.456	0.546
Y3	M	2.8	2.7	3.36	3.03	2.43	2.27	2.33	2.23
	S	1.14	1.19	1.36	1.16	1.02	1.05	1.06	1.22
	C	0.405	0.443	0.403	0.384	0.419	0.461	0.456	0.546
Y4	M	2.72	2.63	3.53	3.03	2.34	2.32	2.32	2.23
	S	1.1	1.16	1.43	1.16	0.98	1.07	1.06	1.22
	C	0.405	0.443	0.403	0.384	0.419	0.461	0.456	0.546
Y5	M	3.26	2.96	4.49	3.4	3.22	3.83	3.02	2.87
	S	1.32	1.31	1.81	1.31	1.35	1.77	1.38	1.57
	C	0.405	0.443	0.403	0.384	0.419	0.461	0.456	0.546

M: Mean, S: Standard deviation, C: Coefficient of variation (COV)

정의와 각각의 극한변위를 적용하여 변위연성도를 산정하면 1.18부터 6.0까지의 값을 가진다. 극한변위 정의 중 U1의 정의는 콘크리트 극한변형률을 기준으로 결정되는 극한변위로서 본 연구에서는 0.004를 기준으로 적용하였다. 극한변위 중 가장 작은 값을 보이는 U1 정의를 제외한 U2~U5 정의를 적용한 변위연성도 값은 3.21~6.0으로 산정되는데 이 값 또한 변위연성도 값을 사용하기 위해서 선택을 해야하는 경우에는 편차가 매우 크다. 단면 및 부재를 구성하고 있는 다양한 변수들에 따라서 다소 차이를 보이고 있으나 실험체별로 변위연성도 값들은 편차가 매우 크게 나타났다.

Table 7의 자료를 바탕으로 Eq. 5와 Eq. 6을 적용하여 평균 (μ , mean)과 표준편차 (σ , standard deviation)를 구하고 Eq. 7을 적용하여 변동계수 (V, coefficient of variation)를 구하여 Table 8에 나타내었다. 표준편차를 평균에 대한 비율로 나타내는 변동계수를 보면, CSP1의 경우는 각 항복강도에 대하여 0.405의 값을 나타내고 있다. 변동계수가 가장 작은 실험체는 CSP4 실험체로 0.384의 값을 가지며 변동계수가 가장 큰 실험체는 CSP8 실험체로 0.546의 값을 나타냈다.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - N\mu^2}{N - 1}} \quad (6)$$

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad (7)$$

7. 결 론

본 연구에서는 축방향철근비, 횡방향철근비, 축력비 등을 주요변수로 형상비 4.5인 축소모형 나선철근 실험체 (8개)에 대한 실험을 수행하여 강도저감거동, 변위연성도를 비교, 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 주요 변수들과 무관하게 모든 실험체에서 초기 균열은 0.25% 변위비에서 발생되었고 휨균열은 0.5% 변위비에서 발생되었다. 모든 실험체들의 축방향철근 항복과 경사균열은 1.0~1.5% 변위비에서 발생되었다. CSP6, CSP7, CSP8 실험체는 축방향철근비가 3.161%로 증가되어 항복에 도달하는 변위비가 지연되었고 CSP5 실험체는 축력비가 증가된 영향으로 판단된다.
- (2) 축력비가 0인 CSP4 실험체는 45° 경사균열이 변위비 1.5%에서 발생되었고 CSP8 실험체는 2.5% 변위비에서 발생되었고 다른 실험체들은 2.0% 변위비에서 발생되었다. CSP8 실험체는 축방향철근비의 증가와 횡철근 간격이 60mm로 배근되어 도로교설계기준에서 요구하는 심부구속철근비보다 22.3% 증가되어 전단강도가 증대된 효과로 판단된다.
- (3) 축방향철근의 항복강도가 낮은 경우에 변위비 4%부터 횡력강도가 급격히 저감하는 경향을 나타내었다. 축력비가 0 및 0.07인 경우보다 축력비가 0.15인 경우가 낮은 변위이력에서 횡력강도의 저감현상이 발생되었고 저하비율도 증가된 것을 분석되었다.
- (4) 동일한 축방향철근 상세를 가지는 경우 심부구속철근량이 증가할수록 연성능력이 증가되고 횡력강도 감소비율 또한 감소되었다.
- (5) 하중 반복횟수에 따른 횡력강도의 강도저감비율을 분석한 결과 실험체의 최종파괴가 발생되기 이전까지의 두 번째 가력시 횡력강도는 첫 번째 가력시 횡력강도의 82% 이상의 값을 나타내었다. 횡철근 간격이 160mm인 경우를 제외하면 93% 이상의 값을 나타내었다.
- (6) 항복변위는 단면 및 부재를 구성하는 변수들에 따라 영향을 받는데 본 연구에서는 5개의 항복변위 정의를 적용하여 산정한 결과, 대부분의 실험체에서 가장 큰 항복변위를 산정하는 항복변위 정의는 균열에 의한 강성저하를 고려하는 활선강성 정의 (Y4)이다. 그 다음

으로 작게 산정하는 정의는 동일한 에너지 흡수량에 근거한 산정법 (Y3), 공칭휨력강도의 할선강성 정의 (Y5), 최초 축방향철근의 항복을 적용하는 산정법 (Y1)이고, 가장 작은 항복변위를 산정하는 항복변위 정의는 탄성영역에서의 초기강성에 기초하여 산정하는 등가탄소성 방법 (Y2)으로 분석되었다.

- (7) 본 연구에서는 5개의 극한변위 정의를 적용하여 산정한 결과, 대부분의 실험체에서 가장 큰 극한변위를 산정하는 정의는 휨력강도 저감에 의한 산정법 (U3)이다. 그 다음으로 작게 산정하는 정의는 철근의 파단에 근거한 산정법 (U4), 최대하중 발생변위에 기초한 정의 (U2), 공칭강도에 기초한 산정법 (U5)이고, 가장 작은 극한변위를 산정하는 정의는 콘크리트 극한변형률에 기초한 산정법 (U1)으로 분석되었다.
- (8) 본 연구에서는 동일한 실험체에서 가장 큰 편차를 보이는 변위연성도는 2.18~8.0이고 가장 작은 편차를 보이는 변위연성도는 1.06~3.66으로 분석되었으나 변위연성도와 응답수정계수를 사용하기 위해 선택을 할 경우에는 매우 신중하게 선택을 해야 할 것이다. 모든 실험체의 변위연성도 변동계수는 0.384~0.546의 범위를 나타내었다.
- (9) 본 연구에서 얻은 기둥부재의 하중변위 곡선과 각각의 항복변위 값을 비교·분석한 결과, Y1, Y2, Y5의 경우는 항복상태가 과소평가되었고, Y3과 Y4의 경우는 항복변위가 적절하게 평가되었다.
- (10) 동일한 변위에 대해 반복하중 재하시 두 번째 가력이 완료될 때까지 철근파단 또는 80%의 휨력감소가 발생하지 않는 이력변위를 극한변위로 결정하는 방법이 합리적이라고 판단된다. 만약 두 번째 가력시 철근이 파단될 경우, 그 이전의 변위이력에서 두 번째 가력까지 완전하게 이루어진 변위단계를 극한변위로 산정하는 방법이다.

감사의 글

이 논문의 실험적 연구는 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구 (No. 2010-0023429)이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chung. Y. S., Lee. J. H., Kim. J. K., "Experimental Study on the Evaluation of Seismic Performance of Existing Bridges of Highway Bridges", Report, 2001, Korea Expressway Corporation, p.397.
2. Kim. G. W., "Nonlinear Analysis of Cycle Lateral Forced RC Shear Wall", vol. 14, No. 5, 2010, pp.161-168. (In Korean)
3. Ko. S. H., Lee, J. H., "Low Cycle Fatigue Model for Longitudinal Reinforcement", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 2, 2010, pp.273-282. (In Korean)
4. Ko. S. H., "Seismic Performance of Square RC Column Confined with Spirals", Journal of the Korea Concrete Institute for Structural Maintenance and Inspection", vol. 16, No. 5, 2012, pp.88-97. (In Korean)
5. Korean Ministry of Construction and Transportation, Korean Standard for Highway Bridges. Korean Society of Civil Engineers. Seoul, Korea, 1992, pp.1279-1388. (In Korean)
6. Korean Road and Transportation Association, Korean Design Specifications for Highway Bridges, 2010. Seoul, Korea, pp.6-38. (In Korean)
7. Lee, J. H., Ko. S. H., "Low Cycle Fatigue Behavior for Longitudinal Reinforcement", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 2, 2010, pp.263-271. (In Korean)
8. Paulay T. and Priestley M. J. N, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building, John Eiley & Sons, Inc., New York, 1992, p.142.
9. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., Seismic Design Retrofit of Bridges, John Willey and Sons, Inc., New York, 1996.
10. Rao, K. B. S., Valsan, M., Sandhya, R., Ray, S. K., Mannan, S. L. and Rodriguez, P., "On the Failure Condition in Strain-Controlled Low Cyclic Fatigue," International Journal of Fatigue, vol. 7, No. 3, July 1985.
11. Sim. J. I., Yang. K. H., "Influence of Anchorage of T-Plate on the Seismic Performance of RC Columns Strengthened with Unbonded Wire Rope Units", vol. 14, No. 1, 2010, pp.133-140. (In Korean)
12. Youm. K. S., Lee. S. H., Lee. Y. H., Song. J. J., Hwang. Y. K., "Performance Evaluation of Scale-down Concrete Filled FRP Columns", vol. 13, No. 1, 2009, pp.135-144. (In Korean)

Received : 09/16/2012

Revised : 12/10/2012

Accepted : 12/14/2012

요 지

형상비 4.5인 축소모형 원형기둥 실험체 8개를 제작하여 일정한 축력 하에서 반복횡하중을 가력하는 실험을 수행하였다. 실험체의 주요 변수는 횡방향철근비, 축방향철근비 (2.017%, 3.161%), 축력비 (0, 0.07, 0.15)이다. 모든 실험체의 횡방향 나선철근 체적비는 소성힌지 구간에서 0.3352~0.8938%의 값을 갖는다. 이 값은 도로교설계기준에서 요구하는 최소 심부구속철근 요구량의 39.7~122.3%에 해당하며, 이는 내진설계가 되지 않은 기존 교각이나 내진설계개념으로 설계되는 교각을 나타낸다. 본 연구의 최종목적은 실험적 기초자료의 제공과 함께 성능단계별 균열, 철근의 항복, 파단 등 정량적 수치와 경향을 제공하기 위한 것이다. 본 논문에서는 실험결과를 통해 분석된 실험변수에 따른 교각의 파괴거동, 강도저감거동, 변위연성도에 대해 중점적으로 기술하였다.

핵심 용어 : 형상비, 횡철근비, 축방향철근비, 강도감소, 변위연성도