

이축방향 유사정적 실험에 의한 이주형 철근콘크리트 원형 교각의 내진 성능평가

정영수^{1)*} · 박창규¹⁾ · 이범기¹⁾ · 송희원¹⁾

¹⁾ 중앙대학교 토목공학과

(2004년 11월 18일 원고접수, 2005년 1월 28일 심사완료)

Seismic Performance Assessment of RC Circular Column-Bent Piers Subjected to Bidirectional Quasi-Static Test

Chung Young Soo^{1)*}, Park Chang Kyu¹⁾, Lee Beom Gi¹⁾, and Song Hee Won¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Korea

(Received November 18, 2004, Accepted January 28, 2005)

ABSTRACT

A RC column-bent pier represents one of the most popular piers used in highway bridges. Seismic performance of reinforced concrete (RC) column-bent piers under bidirectional seismic loadings was experimentally investigated. Six column bent-piers were constructed with two circular supporting columns which were made in 400 mm diameter and 2,000 mm height. One single column specimen was additionally made to comparatively evaluate the seismic response of RC column-bent piers. Test parameters are different transverse reinforcement and loading pattern. These piers were tested under lateral load reversals with the axial load of $0.1 f_{ck} A_g$. Three specimens were subjected to bidirectional lateral load cycles which consisted of two main longitudinal loads and two sub transverse loads in one load cycle. Other three specimens were loaded in the opposite way. Test results indicated that lateral strength and ductility of the latter three specimens were generally bigger than those of the former three specimens. Plastic hinges were formed with the spall of cover concrete and the fracture of the longitudinal reinforcing steels in the bottom plastic hinge of two supporting columns for the former three specimens. Similar behavior was observed in the top and bottom parts of two supporting columns for the latter three specimens.

Key Words: RC column-bent pier, bidirectional seismic loadings, lateral confinement ratio, hysteretic response

1. 서 론

최근 이웃나라 일본에서 발생한 Kobe 지진(1995년)은 Hanshin 고속도로상 교각에 치명적인 손상으로 붕괴를 유발하여 엄청난 경제적 손실을 입혔을 뿐만 아니라 5,000여 명 이상의 많은 사망자를 발생시켰다. 또한 대체로 지진에 대해 안전지대라고 여기어왔던 일본의 니가타 지역에 2004년 10월 연이어 발생한 지진의 피해는 중·저진지역으로 분류되고 있는 우리에게 내진에 대한 관심을 환충 고조시키고 있다. 더욱이 국내에서는 지난 2004년 5월 29일에 재산피해는 발생하지 않았지만 경북 울진 해역에서 규모 5.2의 지진이 발생하였으며, 이는 1978년 계기지진을 관측한 이후 한반도 남반에서 발생한 지진 중 가장 큰 지진이었다. 이에 많은 연구자들이 최근 몇 년 동안 내진에 관하여 많은 연구를 수행하여 좋은 성과를 올리고 있으나,

그 동안의 연구는 단주와 일축반복하중을 받는 교각에 대한 연구가 대부분이었다. 하지만 우리나라 교량교각의 대부분은 다주교각으로 이루어져 있으며 지진하중은 그 방향성이나 크기에 대해 예측할 수 없다. 그럼에도 불구하고 아직까지 다축하중을 받는 다주형 교각에 대한 연구는 전 무한 실정이다.

국내에서 김재관¹⁾ 등은 사각형 철근콘크리트 단주 교각에 관하여 축력이 재하되지 않은 상태로 이축 휨 실험을 하였으며, 실험결과 일축하중을 받는 교각에 비하여 강도, 강성 및 연성이 저하된다고 보고하고 있다. 박창규²⁾ 등은 형상비 4.0의 이주형 원형 교각을 제작하여 축력이 재하된 상태로 주하중방향을 교축방향으로 한 이축 휨 실험을 하여, 과거 단일주에 대한 연구결과와 동일하게 주철근 겹침이음이 있거나, 횡구속철근비가 적을수록 교각의 연성능력이 저하되며, 이축하중 재하시 일축하중재하시보다 연성의 저하를 가져온다고 보고하였다. 국외에서는 NCEER 보고서에서 J.B. Mander³⁾는 주철근 겹침이음이 있는 3주형 교각을 단면증설 보강하여 향상된 내진성능을 얻었으며 이

* Corresponding author

E-mail: chung47@cau.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

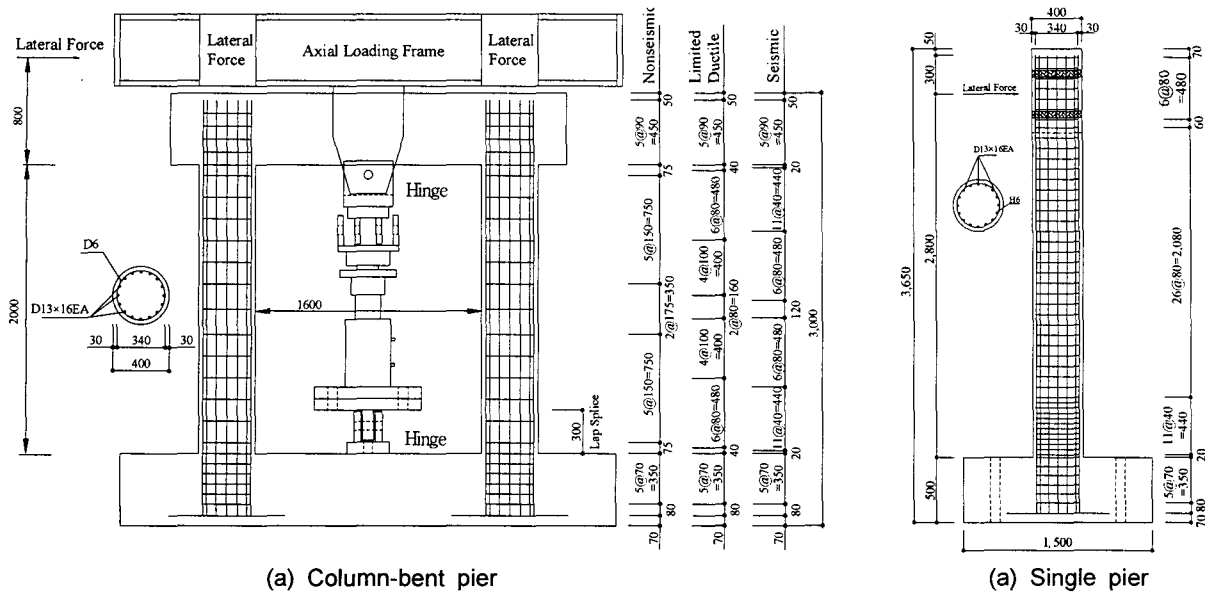


Fig. 1 Detailed dimension of test specimens (unit in mm)

연구로 향상된 분석기술과 디자인을 설계하고자 하였다. 또한 J.B.Mander⁴⁾등은 시공된 지 32년 된 이주형 교각의 안전성 평가를 하였으며 연결부와 힌지부에 횡철근 부족으로 인한 위험이 있음을 밝혀내었다. Claudia pulido⁵⁾는 1970년 이전에 건설되었던 이주형 교각을 모델로 1/4의 크기로 축소하여 탄소섬유로 보강을 한 후 내진성능을 평가하여 휨능력과 전단파괴에 대한 저항능력의 증대를 가져왔다.

본 논문에서는 다양한 횡구속 철근비에 따른 내진성능을 실험적으로 파악하였으며 주축방향에 따른 교각의 내진성능을 비교하였다. 주철근 겹침이음이 없는 비내진(nonseismic) 설계된 교각, 현행 도로교 설계기준에 따른 내진(seismic)설계된 교각, 그리고 내진설계의 50%에 해당하는 횡방향 구속철근비를 갖는 한정연성(limited ductile)실험체의 내진성능을 평가하였다. 하중재하 방향을 교축과 교축직각방향을 각각 주축으로 하는 이축반복하중을 가력하여 하중의 방향에 따른 내진성능을 평가하였다.

49.7% 인 레디믹스트 콘크리트를 사용하였으며 기둥본체에 타설된 콘크리트의 28일 평균압축강도는 28 MPa를 얻었다. 그리고 주철근 및 띠철근은 각각 SD30인 D13과 D6을 사용하였으며, 인장실험결과 항복강도는 각각 330MPa (D13), 390 MPa(D6)로 나타났다. 실험체는 Fig. 1과 Table 2와 같이 단면지름이 0.4m, 기둥높이 2m이며 횡방향하중 가력높이는 코핑부(coping) 및 받침부(shoe) 높이까지 고려한 2.8m이었다. 주철근비는 정영수⁶⁾등의 연구결과, 대다수의 기존 교량의 주철근비가 1~2%로 조사되었으며, 또한 이전 단주의 연구결과와 비교를 위하여 유사한 주철근비인 1.61%로 선정하였다. 실험체는 이주형 겹침이음이 없는 비내진실험체, 한정연성실험체, 내진실험체 각 2기 및 단주실험체 1기등 총 7기를 제작하여 횡구속철근비에 따른 내진성능을 평가하고, 주하중 재하방향에 따른 실험체의 거동을 규명하였다. 그리고 다주와 동일한 단면과 높이를 가진 단주형 실험체를 설계, 제작하여 단주와 다주의 거동을 비교하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

Table 1은 콘크리트의 배합표로서, 교각실험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수는 25mm이며, W/C

2.2 실험방법

본 실험에서는 Fig. 2와 같이 축방향력 작용하에 교축 및 교축직각방향을 이축방향으로 횡하중을 재하하도록 계획되었다. 실험체의 상부에는 축방향력과 2방향의 횡하중을 재하할 수 있는 철물을 제작하였으며 코핑부와 완전

Table 1 Mix proportion of concrete

Size of maximum coarse agg.(mm)	W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)	Unit mass (kg/m ³)					Compressive strength(MPa)
				Water	Cement	Coarse agg.	Fine agg.	A.E.	
25	49.7	3.9	130	171	344	975	852	1.73	28

Table 2 Characteristics of test specimens

Specimens			Longitudinal steel(16D13)	Transverse steel(D6)		Axial load(kN) $\frac{P}{f_{ck}A_g} = 0.1$
			Ratio (%)	Ratio (%)	Space(mm) PHR / NPHR	
L-series	Nonseismic	N2C-SP00-L	1.61%	0.231	150 / 150	600
	Limited ductile	L2C-SP00-L		0.433	80 / 100	
	Seismic	S2C-SP00-L		0.867	40 / 80	
T-series	Nonseismic	N2C-SP00-T		0.231	150 / 150	
	Limited ductile	L2C-SP00-T		0.433	80 / 100	
	Seismic	S2C-SP00-T		0.867	40 / 80	
Single pier	Seismic	S1C-SP00		0.867	40 / 80	300

-L and -T: Longitudinal and transverse axis for the direction of main loading, respectively

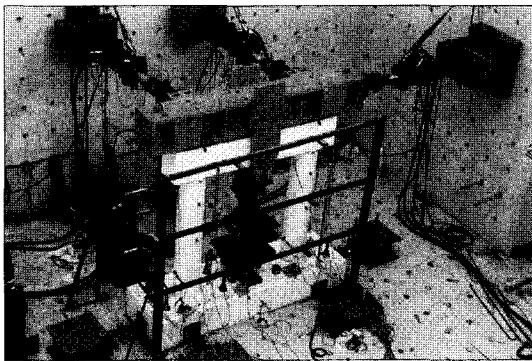
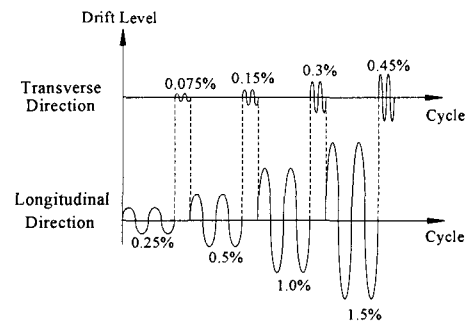


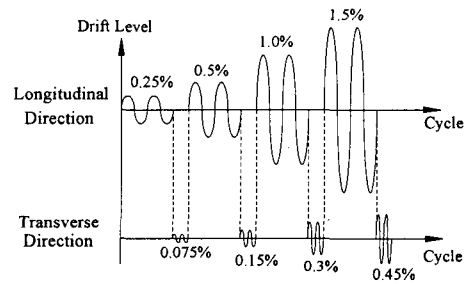
Fig. 2 Test setup

일체가 되어 거동할 수 있도록 하였다. 또한 축방향력은 $0.1f_{ck}A_g$ 를 재하 하도록, 이주형 교각의 경우 600 kN을 가력하여 각 교각에 300 kN이 재하되도록 하였으며, 단주 교각도 300 kN을 재하 하였다. 그리고 횡방향 하중은 교 축방향의 경우 1,000 kN (stroke \pm 250 mm)용량 2개의 유압가력기(actuator), 교축 직각방향은 500 kN (stroke \pm 125 mm)용량 1개의 유압가력기를 가력비에 부착하여 재하하였다. 실험수행후의 실험체의 거동을 분석하기 위한 측정 장비로 하중과 변위값은 유압가력기에 내장되어 있는 하중계를 이용하였으며, 횡방향변위를 측정하기 위하여 변위계를 설치하였다. 또한 주철근, 띠철근에 변형률 게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였으며, 하단으로부터 0.2m, 1.8m, 2.0m 지점에 경사계를 설치하여 상·하부 소성흔지 구간의 곡률을 측정하였다.

Fig. 3은 주하중방향에 따른 하중재하방법을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 주하중방향이 교축방향인 실험체의 하중재하방법이며, Fig. 3(b)는 주하중방향이 교축직각방향인 실험체의 하중재하방법이다. drift level로 표현된 변위 제어량은 기둥의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트 (%)로, 주방향 하중이 교축방향인 실험체는 기초상단에서 가력부까지 높이 2.8m, 주방향이 교축직각 방향인 실험체는 기둥의 유효길이 1m의 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$... 단계로 점점 증가되는



(a) L series



(b) T series

Fig. 3 Bidirectional load history

변위이력을 파괴시까지 도입하였으며, 각각의 가력변위크기 마다 동일 변위를 2회 반복재하 하여 교각의 거동특성을 비교 분석하였다. 또한 각각 실험체의 부방향 하중의 크기는 주방향의 30%에 해당하는 값으로 주방향과 동일하게 2회 반복 재하 하였다.

3. 실험결과

3.1 실험체의 거동특성

Table 3은 실험진행에 따른 실험체의 파괴거동을 가력 변위크기에 따라 비교·정리하였다. 균열형태를 분석하면 주하중방향이 교축방향의 실험체의 경우 모든 실험체의 초기균열이 가력변위크기 0.25%에서 교각 하단으로부터 약 0.5D에서 발생하였으며 가력변위크기 1.5%에서 항복

Table 3 Failure modes

Drift level(%)		0.25	0.5	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	8.50	9.00	10.00	11.00
L series	N2C-SP00-L	★			●		♥	◆	◎	△						
	L2C-SP00-L	★			●		♥	◆			▲◎					
	S2C-SP00-L	★			●		♥			◆			▲			
T series	N2C-SP00-T		★		●		♥		◆			◎△				
	L2C-SP00-T		★		●		♥		◆						◎▲	
	S2C-SP00-T		★		●						♥◆					▲
Single pier	S1C-SP00	★			●		♥◆					◎				

★ : Initial crack ♥ : Vertical crack ● : yield lateral force ◆ : Maximum lateral force ◎ : Ultimate lateral force
 ▲ : Longitudinal steel failure △ : Shear failure

하중에 도달하고 가력변위크기 3.0%에서 압축단에서 수직균열이 발생하였다. 주하중방향이 교축직각방향인 실험체의 경우 초기균열이 가력변위크기 0.5%에서 발생하였으며 가력변위크기 2.0%에서 항복하중에 도달하였다. 실험체에 따라 가력변위크기 3.0% (N2C-SP00-T), 4.0%(L2C-SP00-T), 7.0%(S2C-SP00-T)에서 수직균열이 발생하였다.

첫 번째 주철근 파단은 횡구속철근비가 증가함에 따라 늦게 발생하였다. 한정연성실험체(L2C-SP00-L)는 가력변위크기 7.0% 에서 파단되었고 내진실험체(S2C-SP00-L)는 유압가력기의 최대가력변위(250mm)의 한계로 인하여 가력변위크기 8.5%(238mm)를 반복재하하였으며 반복재하시에 교각하부의 주철근이 파단되었다. 그러나 비내진 실험체(N2C-SP00-L)의 주철근은 파단되지 않았다. 이는 횡구속철근비의 부족으로 인해 주철근이 파단되는 변형까지 연성능력을 확보하지 못하였기 때문이며, 이로 인하여 교축직각방향 가력시 전단파괴가 발생하였다.

모든 실험체에서 띠철근은 파단되지 않았으며 가력변위크기 6.0%(L2C-SP00-T), 7.0%(S2C-SP00-T)에서 상부의 피복이 탈락하였으며, 콘크리트 피복의 탈락은 하부의 외측에서 발생한 후 상단의 내측에서 발생하였다.

소성힌지는 주하중방향이 교축직각방향인 실험체의 경우 교축방향인 실험체와 달리 교각의 상부에도 형성되어 파괴가 발생하였다. 주하중방향이 교축방향인 실험체(L-series)는 교각의 하부에만 소성힌지가 발생하여 파괴가 발생되었다. 하지만 주 하중방향이 교축직각방향인 실험체(T-series)의 경우는 가력변위크기 3.0%(N2C-SP00-T), 4.0% (L2C-SP00-T), 4.0%(S2C-SP00-T)에서 상부에도 균열이 발생하였으며, 각각 가력변위크기 6.0% (N2C-SP00-T), 6.0% (L2C-SP00-T), 7.0%(S2C-SP00-T)에서 상부의 피복이 탈락되었다. 그리고 콘크리트 피복의 탈락은 하부의 외측에서 발생한 후 상단의 내측에서 발생하였다.

비내진실험체(N2C-SP00-L, N2C-SP00-T)의 경우 초기에는 휨파괴의 양상으로 진행되다 급작하게 전단파괴가 발생하였다. Figs. 4(a) 및 (d)에서 보이는 바와 같이 N2C-SP00-L 실험체는 부하중 방향 가력변위크기 6.0%, N2C-

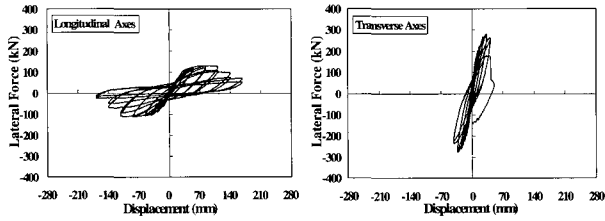
-SP00-T 실험체는 주하중 방향 가력변위크기 8.0%에서 모두 교축직각방향 하중재하시 전단파괴가 발생하였다. 이는 피복콘크리트 탈락에 따른 콘크리트의 전단내하력 부족과 횡구속철근비의 부족으로 판단된다.

3.2 하중변위 이력곡선

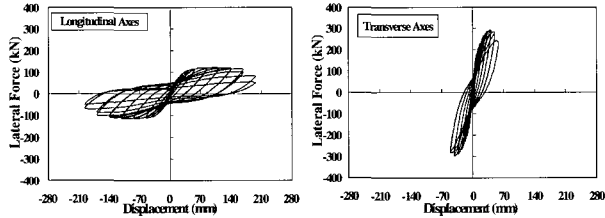
Figs. 4~5은 각 실험체에 따른 하중-변위이력곡선을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 주철근 겹침이음이 없는 비내진설계된 교각(N2C-SP00-L)의 실험결과로 교축방향 가력변위크기 4.0%(112mm) 이후 횡구속력 부족으로 인하여 연성이 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 극한점 이전 최종 파괴시 가력변위크기 6.0%(168mm)에서는 피복콘크리트가 완전히 탈락되고 교축직각 방향 재하시에 전단으로 파괴되었다. 그리고 Fig. 4(b)은 현행 내진 규정의 50%, 비내진 교각의 1.87배인 0.433% 횡구속철근비를 갖는 한정연성 실험체(L2C-SP00-L) 결과로 가력변위크기 6.0%(168mm) 주철근이 파단되기 전까지는 하중의 저하 없이 연성이 비내진 실험체에 비하여 증가되는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)은 현행 도로교 설계기준의 내진규정에 따라 설계된 내진실험체(S2C-SP00-L)의 실험결과로서 연성능력이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 이 내진 실험체의 경우 유압가력기의 가력변위의 한계인 250mm로 인하여 가력변위크기 8.5%(238mm)를 파괴시까지 반복재하였다.

비내진 설계된 교각(N2C-SP00-T) Fig. 4(d)의 경우는 극한점도달 이전에 횡구속철근의 부족으로 인하여 교축직각 방향재하시에 전단으로 파괴되었다. 한정연성으로 설계된 교각(L2C-SP00-T) Fig. 4(e)의 경우 가력변위크기 10.0%(100mm)에서 주철근이 파단될 때 하중의 급격한 감소를 볼 수 있다. 내진 설계된 다주교각(S2C-SP00-T) Fig. 4(f)의 경우 단주교각(S1C-SP00) Fig. 5의 경우 연성능력이 매우 뛰어난 것을 볼 수 있다.

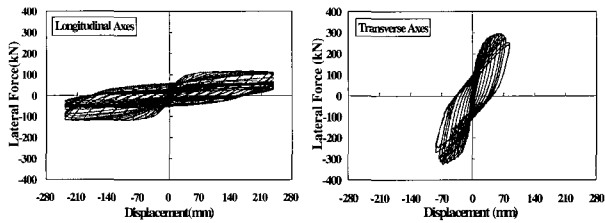
주하중방향에 관계없이 횡구속 철근비가 증가 할수록 파괴진행이 지연되어 항복변위에 대한 극한변위 값인 변위연성도가 크게 나타났다. 즉, 횡구속철근비가 증가 할수



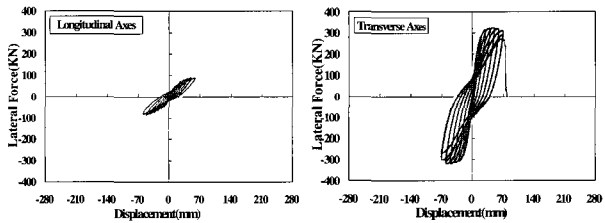
(a) N2C-SP00-L



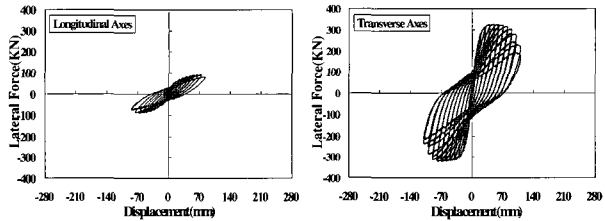
(b) L2C-SP00-L



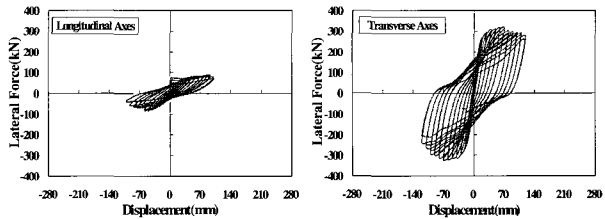
(c) S2C-SP00-L



(d) N2C-SP00-T



(e) L2C-SP00-T



(f) S2C-SP00-T

Fig. 4 Force-displacement hysteresis of column-bent piers

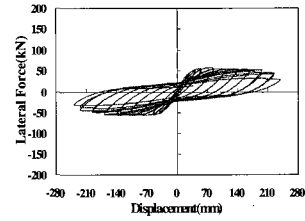


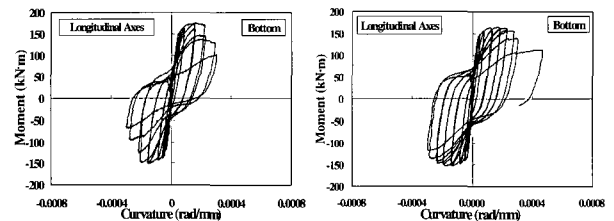
Fig. 5 Force-displacement hysteresis of single column

록 실험체는 더 좋은 연성거동을 나타내고 있다.

특히, 다주구조에서는 코핑부의 강성영향 및 복합거동을 고려할 수도 있으나, 본 연구에서는 교각상단 코핑부에 발생한 균열은 매우 미세하고, 교각의 코핑부의 강성이 충분히 크기 때문에 교각의 연성거동에는 큰 차이가 없을 것으로 판단되어 이들의 영향은 상세히 분석하지 않았다.

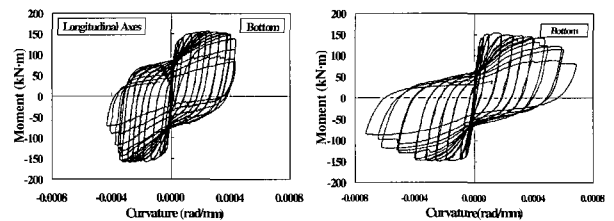
3.3 모멘트-곡률이력곡선

Fig. 6은 주하중방향이 교축방향인 실험체들의 교각 하부에서 높이 200 mm까지 단면의 모멘트-곡률이력곡선을 보여주고 있다. 교각 상부에서는 모든 실험체에서 곡률이 거의 발생하지 않았다. Fig. 6의 결과는 Fig. 4의 하중-변위 이력곡선의 결과와 동일하게 횡구속철근비가 증가할수록 교각하부 소성힌지구간의 곡률연성은 증가하였다. 이상의 결과는 Fig. 6(d)의 단주 결과와 매우 동일하게 나타나 이주형 교각의 경우라도 주하중방향이 교축방향일 경우에는 단주와 거동이 유사하다고 판단된다. 따라서 다주 교각일지라도 교축방향 지진하중이 작용할 경우 그 내진 성능 판단은 단주의 기준을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 주하중방향이 교축직각방향인 실험체의 경우



(a) N2C-SP00-L

(b) L2C-SP00-L



(c) S2C-SP00-L

(d) SIC-SP00-L

Fig. 6 Moment-curvature hysteresis of test specimens

계측오류로 인해 모멘트-곡률에 관한 분석자료를 측정하지 못하였다.

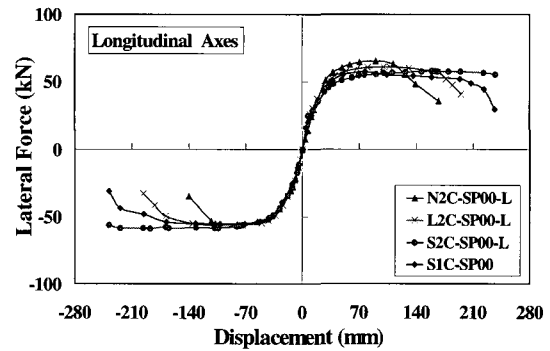
4. 결과분석

4.1 변위 및 곡률연성도

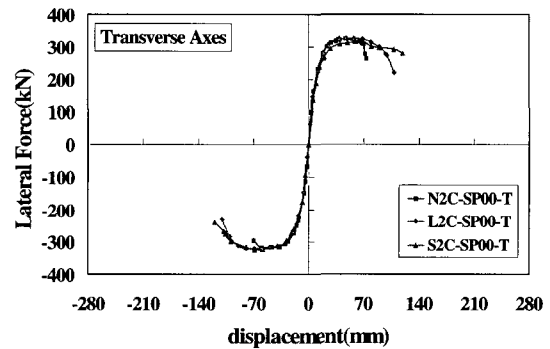
하중-변위 포락곡선상에서 최대 횡력 V_{max} 를 지나는 수평선과 원점에서 V_{max} 의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선의 연장선과의 교점을 항복변위로 정의하였으며, 극한점은 최대하중에서 15% 감소된 $0.85V_{max}$ 가 되는 점으로 결정하여, 항복변위에 대한 극한변위의 값으로 연성도를 정의하였다. 항복 및 극한곡률도 동일하게 정의하였으며, 변위 및 곡률연성도를 Table 4에 비교정리 하였다. Figs. 7과 8에서 다주의 경우 단주와의 비교를 위하여 하중 및 모멘트를 2로 나누어 교각 1개에 대한 포락곡선으로 표현하였다. 분석결과 주철근 겹침이음이 없이 비내진 설계된 경우 이전 연구^{8,9)}에서는 일축반복하중을 받을시 요구연성도를 만족하는 것으로 보고하고 있으나, 본 연구에서 이축반복하중을 받는 비내진 실험체 (N2C-SP00-L, N2C-SP00-T)는 요구연성도에 상당히 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 일축이 아닌 이축반복하중을 받음으로서 손상도가 증가하여 연성이 저하되는 것으로 생각된다. 그러나 횡구속철근비가 증가할 수록 연성도가 증가하는 것으로 이전의 일축반복하중을 받는 단주형 교각의 연구결과와 유사하게 나타났다. 한정연성 실험체의 경우 이전연구⁶⁻⁸⁾에서 일축반복하중을 받는 단주결과를 살펴보면 현행 내진규정의 30% 혹은 40% 만의 횡구속철근비에도 현행 규정의 요구연성도를 만족하였으나, 본 실험체 (L2C-SP00-L, T)는 현행규정의 50%에 해당하는 횡구속철근비로도 이전 단주의 결과에 비해 낮은 결과를 보이며 변위연성도 5에 근접하는 것으로 나타났다. 이는 내진설계시 이축 반복하중을 받는 경우도 고려해야 한다는 것을 의미한다. 내진 실험체(S2C-SP00-L)의 경우 그 연성도가 매우 뛰어나 요구연성도를 충분히 만족하지만 정확한 변

위연성도를 구하지는 못하였다. 즉, 이 결과를 통하여 중저진지역에 속하는 우리나라에 적합하도록, 현행 내진규정을 보다 완하시킨 횡구속철근비를 갖도록 개정할 필요가 있다고 판단된다.

주하중 방향이 교축직각방향인 실험체는 교축방향인 실험체와 같이 횡구속철근비가 증가할수록 연성도가 증가하는 값을 나타내고 있다. 한정연성실험체(L2C-SP00-T)의 경우 L2C-SP00-L실험체와 같이 요구 연성도에 근접하는 것으로 나타났다. 내진실험체(S2C-SP00-T)의 경우 연성도가 뛰어나 극한상태까지 실험을 수행하지 못하였지만 S2C-SP00-L 실험체보다 연성도가 좋을 것으로 예상된다.



(a) L series envelope curve



(b) L series envelope curve

Fig. 7 Force-displacement envelope curve

Table 4 Displacement and curvature ductility

Specimen	Yield		Ultimate		Ductility		
	Displacement (mm)	Curvature (rad/mm)	Displacement (mm)	Curvature (rad/mm)	Displacement	Curvature	
L series	N2C-SP00-L	37.0	4.6E-5	126.4	2.55E-4	3.5	5.54
	L2C-SP00-L	36.8	3.3E-5	176.9	3.31E-4	4.8	10.01
	S2C-SP00-L	38.7	3.7E-5	> 238.0	4.36E-4	> 6.2	> 11.77
T series	N2C-SP00-T	18.3	-	72.0	-	4.0	-
	L2C-SP00-T	19.2	-	98.4	-	5.1	-
	S2C-SP00-T	20.3	-	> 120.0	-	> 5.9	-
Single pier	S1C-SP00	37.4	4.27E-5	207.8	5.26E-4	5.6	13.43

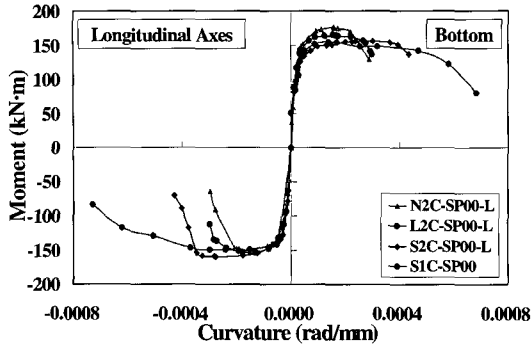


Fig. 8 Moment-curvature envelope curve

주하중 방향이 교축직각방향인 실험체가 교축방향을 주 하중방향으로 하는 실험체보다 더 좋은 연성도를 나타내었다. 이는 교축직각방향 재하시에는 기둥의 유효길이가 짧아지므로 내하력이 크고, 소성힌지구간이 기둥의 상·하단에서 모두 생기면서 하중부담을 기둥의 상·하단에 분배하여 저항하기 때문에 연성도가 증가하는 것으로 판단된다.

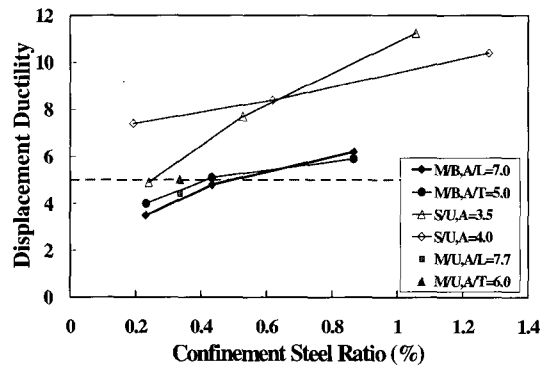
다주교각의 경우 교축방향으로는 단주와 같은 거동을 하고 교축직각방향으로는 프레임 거동을 하므로 교축직각방향으로는 내하력이 커서 설계지진이 작용하여도 탄성역역을 벗어나지 않을 수 있기 때문에 응답수정계수에 대한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

4.2 횡구속철근비와 연성도와의 관계

Fig. 9는 횡구속철근비에 따른 변위연성도를 비교하였다. 그래프에서 보는 바와 같이 단주실험체(S-series)의 경우 다주실험체(M-series)보다 높은 연성도를 나타내었다. 그리고 주하중방향이 교축방향인 실험체와 교축직각방향인 실험체를 비교해 보면 교축직각인 방향인 실험체의 연성도가 더 높게 나타남을 볼 수 있다. 이는 주하중방향인 교축직각방향인 경우 상하부에 소성힌지가 발생하면서 기둥전면으로 힘을 분배시키기 때문이다. 내진실험체(S2C-SP00-L, S2C-SP00-T)의 경우에는 주하중방향이 교축방향인 실험체가 더 높은 연성도를 나타내었지만, 이는 유압가력기의 가력변위 부족으로 극한시까지 실험을 수행하지 못한 결과로 극한시점까지의 실험수행시 주하중방향이 교축직각방향인 실험체가 더 좋은 연성도를 나타낼 것으로 예상된다. 또한 일축반복하중을 가한 다주실험체와 이축반복하중을 가한 다주실험체를 비교해보면 많은 차이는 보이지 않지만 일축반복하중을 준 실험체가 더 좋은 연성도를 나타내고 있다. 주하중방향이 교축방향인 이주형 실험체 M/B,A/L와 M/U,A/L를 비교해보면 이축하중을 준 실험체(M/B,A/L)가 일축하중을 준 실험체(M/U,A/L)보다 8%의 변위연성도 감소를 가져왔다. 또한 주하중방향이 교축직각방향인 실험체 역시 이축하중을 준 실험체(M/B,A/T)가 일축하중을 준 실험체(M/U,A/T)보다 4%의

변위연성도 감소가 발생하였다. 이는 이축방향 하중을 가함으로써 손상도가 증가되어 연성도의 감소를 가져오는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 교축방향 실험체의 횡구속철근비에 따른 곡률연성도를 비교한 그래프이다. 곡률연성도의 경우 형상비가 증가할수록 감소하는 모습을 보여주고 있다. 또한 이축하중을 받는 다주실험체의 경우 비내진 실험체는 Eurocode 8에서 제시한 한정연성 요구곡률연성도 7에도 만족하지 못하였으나, 한정연성실험체는 만족하였다. 또한 내진실험체의 경우 극한상태까지 실험을 수행하지 못하였으나 요구연성도 13은 충분히 만족할 수 있었으리라 판단된다.



A : Aspect ratio, S : Single column, M : Multi column
U : Unidirection loading, B : Bidirectional loading
L : Longitudinal Loading, T : Transverse Loading

Fig. 9 Comparison of displacement ductility

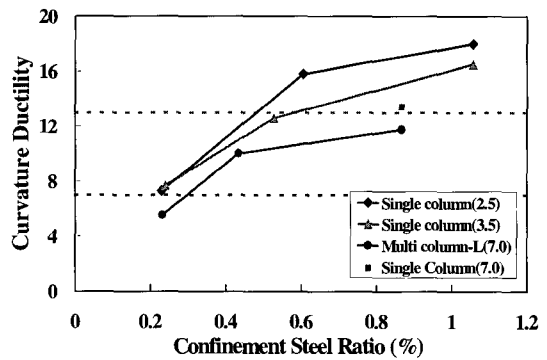


Fig. 10 Comparison of curvature ductility

5. 결 론

- 1) 주 하중방향이 교축방향인 경우의 이주형 교각의 내진 거동은 단주교각의 파괴거동과 유사하게 교각하부에서만 파괴되었다. 또한, 주 하중방향이 교축직각 방향인 실험체의 경우 교각상부에도 소성힌지부가 발생하여 균열이 발생하고 파괴되었다.
- 2) 횡구속 철근비를 증가시키에 따라서 교각의 연성도가 증가하였으며, 주하중방향이 교축직각인 실험체의 경우

교축인 실험체보다 더 좋은 연성도를 나타냈다. 즉, 교축직각방향으로는 내하력이 커서 설계지진이 작용하여도 탄성역역을 벗어나지 않을 수 있기 때문에 응답수정계수에 대한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

- 3) 한정연성 교각의 경우 비내진 교각보다 연성도가 41% 높게 나타났다. 그러나 일축 반복 하중을 받는 경우 횡구속 철근비가 현행 내진규정의 30% 만으로도 요구 변위연성도 5를 만족하였으나, 이축 반복하중을 받는 경우에는 현행 내진규정의 50%로서 일축반복하중 경우보다 1.67배 증가시킨 횡구속 철근비로 요구 변위연성도 5에 거의 근접하였다. 내진실험체의 경우는 요구 연성도를 충분히 만족하는 것으로 나타나 중진지역에 적합한 내진 횡구속 철근비 규정은 이축반복하중에 의한 연구결과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김재관, 김익현, 이재호, 김남식, "이축방향 교번반복하중을 받는 구형 철근 콘크리트교각의 거동특성 시험", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 5권, 1호, 2001, pp.323~328.
2. 박창규, 이범기, 송희원, 정영수, "2방향 반복하중을 받는 이주형 원형 철근콘크리트 교각의 내진 성능", 한국지진공학회 논문집, 9권, 1호, 2005, pp.17~24.
3. J.B.Mander, J.H.Kim and C.A.Ligozio, "Seismic of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit," Technical Report NCEER-96-0009, NCEER, 1996.
4. J.B.Mander, Waheed, M.T.A.Chaudhart and S.S.Chen, "Seismic Performance of Shear-Critical Reinforced Concrete Bridge Piers," Technical Report NCEER-93-0010, NCEER, 1993.
5. Claudia Pulido, M. Saiid Saiidi, David Sanders, Ahmad Itan, and Saad El-Azazy, "Seismic Performance of Two-Column Bent-Part1:Retrofit with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Fabrics," *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.4, 2004, pp. 558~568.
6. 정영수, 이재훈, 김재관 등, "고속도로 기존 교량의 유형별 내지 성능평가를 위한 실험적 연구", 한국도로공사, 2001.
7. 이재훈, 김광수, 배성용, "지진하중에 대한 고강도콘크리트 나선철근교각의 한전연성거동", 대한토목학회논문집, 23권, 3A호, 2003, pp.385~395.
8. 정영수, 박창규, 이은희, "지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도 평가", 한국지진공학회 논문집, 7권, 3호, 2003, pp.79~88.
9. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, "주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 대한토목학회논문집, 22권, 5A호, 2002, pp.1193~1202.
10. 건설교통부, "도로교설계기준", 건설교통부, 2000.
11. M. J. N. Priestly, Seible, F., and Calvi, G.M., "Seismic Design and Retrofit of Bridge," John Wiley & Sons, Inc., 1996.
12. F. A. Zahn, R. Park, and M. J. N. Priestley, "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending," *ACI Structural Journal*, Vol.56, No.2, 1989, pp.123~130.
13. Yuk-Lung Wong, T. Paulay, and M. J. N. Priestley, "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Direction Seismic Attack," *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.2, 1993, pp.180~191.
14. Robert Sexsmith, Donald Anderson, and Daryl English, "Cyclic Behavior of Concrete Bridge Bents," *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.2, 1997, pp.103~113.

요 약

본 연구에서는 국내고속도로에서 많이 사용되고 있는 이주형 교각을 주하중방향에 따른 이축지진하중에서의 지진응답을 실험적으로 조사하였다. 실험체는 지름 400 mm, 높이 2,000 mm인 이주형 원형 교각 6기 및 단주형 원형교각 1기를 제작하였으며, $0.1 f_{ck} A_g$ 크기의 축방향 하중작용하에서 횡방향 하중을 주하중방향을 교축방향과 교축방향으로 하여 이축으로 교번반복재하하였다. 실험변수는 횡구속 철근비와 주하중방향으로 주하중이 교축방향인 실험체는 기존의 단주와 같이 하부에만 소성힌지부가 발생하는 휨과괴 양상을 나타내었지만 주하중방향이 교축직각방향인 경우 교각의 하단부 뿐만 아니라 교각의 상부에서도 소성힌지가 발생하였으며, 주하중방향이 교축방향인 실험체보다 더 좋은 연성도를 나타내었다.

핵심용어 : 이주형 철근콘크리트 교각, 이축방향 유사정적실험, 횡구속비, 지진응답