

## 2축 반복하중을 받는 2주형 RC 원형교각의 주하중방향에 따른 내진성능평가

### Seismic Performance of RC Circular Column-Bent Piers under Bidirectional Repeated Loadings according to Main Loading Direction

박창규\*                      이범기\*\*                      윤상철\*\*                      정영수\*\*\*  
Park, Chang Kyu      Lee, Beom Gi      Song, Hee Won      Chung, Young Soo

#### 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. Test parameters are different transverse reinforcement and loading pattern. These piers were tested under lateral load reversals with the axial load of  $0.1f_{ck}A_g$ . 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.

#### 1. 서론

이웃나라 일본에서는 1995년 발생한 Kobe 지진으로 Hanshin 고속도로상 교각이 치명적인 손상에 의해 붕괴되어 엄청난 경제적 손실을 입혔을 뿐만 아니라 5,000여명 이상의 많은 사망자를 발생시켰다. 또한 지진에 대해 안전지대라고 여기어왔던 니가타 지역에 2004년 10월 연이어 발생한 지진의 피해로 많은 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 중·저진지역으로 분류되고 있는 우리나라도

\* 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 박사수료

\*\* 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 석사과정

\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수

더 이상 지진에 대해 안전지대가 아니다. 지난 2004년 5월 29일에 재산피해는 발생하지 않았지만 경북 울진 해역에서 규모 5.2의 지진이 발생하였으며, 이는 1978년 계기지진을 관측한 이후 한반도 남한에서 발생한 지진 중 가장 큰 지진이었다. 이에 우리나라에서도 내진설계에 대한 관심이 증가되었다. 우리나라 교량교각의 대부분은 다주교각으로 이루어져 있으며 지진하중은 그 방향성이나 크기에 대해 예측할 수 없음에도 불구하고 그동안의 연구는 단주와 일축반복하중을 받는 교각에 대한 연구가 대부분이었다.

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.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험계획 및 방법

주철근 및 띠철근은 각각 SD30인 D13과 D6을 사용하였으며, 인장실험결과 항복강도는 각각 330MPa (D13), 390 MPa(D6)이며, 콘크리트의 28일 평균압축강도는 28 MPa로 나타났다. 실험체는 그림 1과 표 1과 같이 단면지름이 0.4m, 기둥높이 2m이며 횡방향하중 가력높이는 코핑부(coping) 및 받침부(shoe) 높이까지 고려한 2.8m이었다. 주철근비는 이전 단주의 연구결과와 비교를 위하여 유사한 주철근비인 1.61%로 선정하였다. 실험체는 이주형 겹침이음이 없는 비내진실험체, 한정연성실험체, 내진실험체 각 2기를 제작하여 횡구속력 및 횡구속철근비에 따른 내진성능을 평가하고, 주하중 재하방향에 따른 실험체의 거동을 규명하였다.

표 1. 시험체의 특성

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	

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

\* PHR : 소성힌지구간, NPHR : 비소성힌지구간

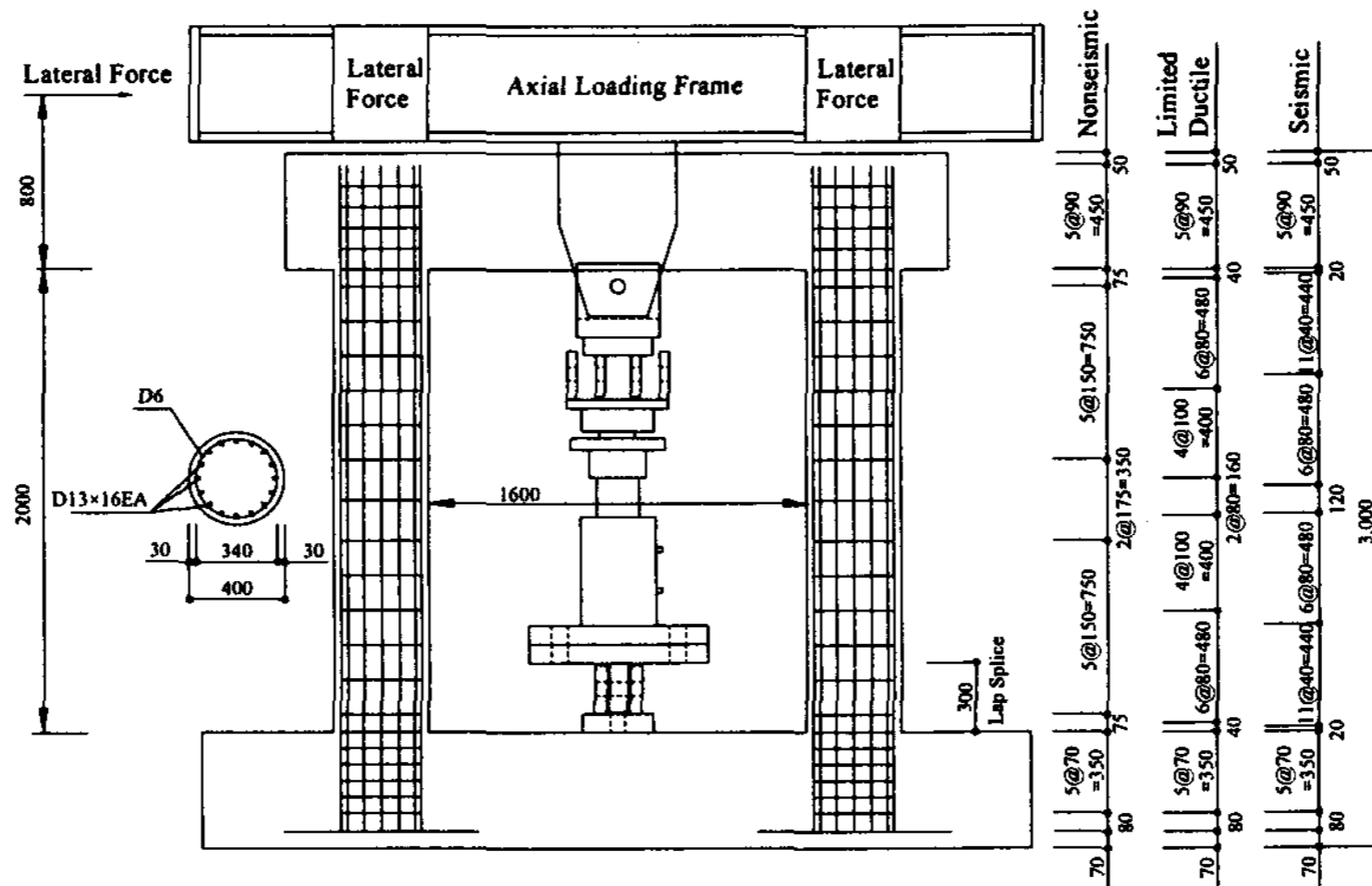


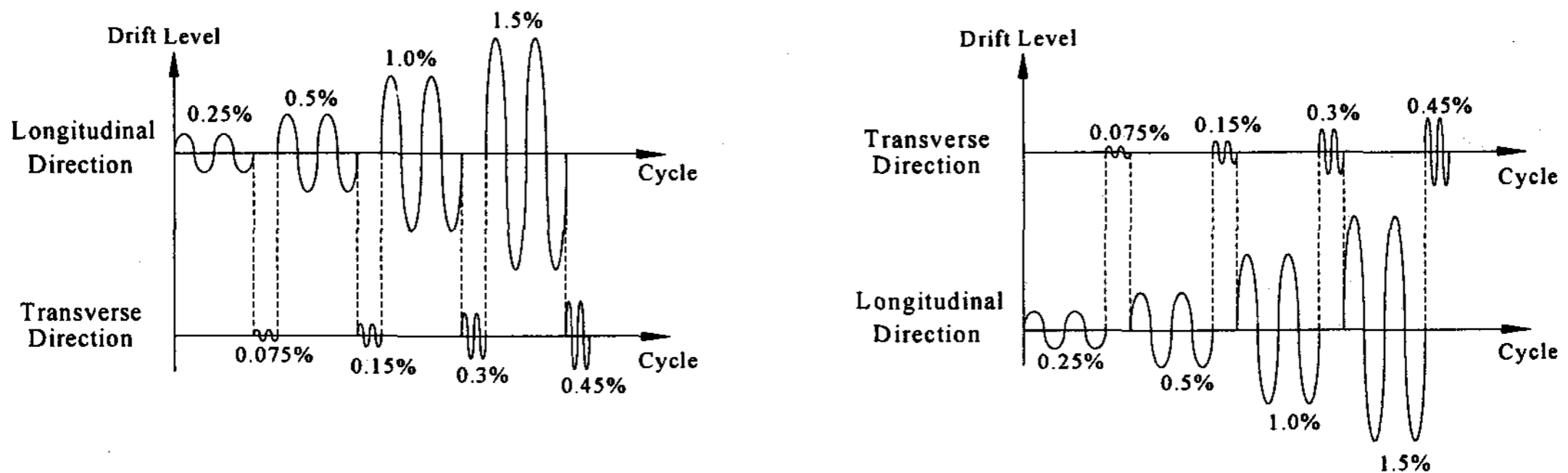
그림 1. 실험체 상세

## 2.2 실험방법

본 실험에서는 그림 2와 같이 축방향력 작용하에 교축 및 교축직각방향의 이축방향으로 횡하중을 재하하도록 계획되었다. 실험체의 상부에는 축방향력과 2방향의 횡하중을 재하할 수 있는 철물을 제작하였으며 코핑부와 완전일체가 되어 거동할 수 있도록 하였다. 또한 축방향력은  $0.1f_{ck}A_g$ 를 재하하도록, 600 kN을 가력하여 각 교각에 300 kN이 재하되도록 하였으며 횡방향 하중은 교축방향의 경우 1,000 kN(stroke±250 mm)용량 2개의 유압가력기(actuator), 교축 직각방향은 500 kN (stroke ± 125 mm)용량 1개의 유압가력기를 가력벽에 부착하여 재하하였다. 실험수행후의 실험체의 거동을 분석하기 위한 측정장비로 하중과 변위값은 유압가력기에 내장되어 있는 하중계와 변위계를 이용하였으며, 주철근, 띠철근에 변형률 게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다.



그림 2 실험전경



(a) L series

(b) T series

그림 3 하중재하방법

그림 3은 주하중방향에 따른 하중재하방법을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 주하중방향이 교축방향인 실험체의 하중재하방법이며, 그림 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 2.8 m, 주방향이 교축직각 방향인 실험체는 기둥의 유효길이 1 m의  $\pm 0.25\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 1.0\%$ ,  $\pm 1.5\%$ ,  $\pm 2.0\%$ ,  $\pm 3.0\%$ ,  $\pm 4.0\%$ ... 단계로 점점 증가되는 변위이력을 파괴시까지 도입하였으며, 각각의 가력변위크기 마다 동일 변위를 2회 반복재하 하여 교각의 거동특성을 비교 분석하였다. 또한 각각 실험체의 부방향 하중의 크기는 주방향을의 30%에 해당하는 값으로 주방향과 동일하게 2회 반복 재하하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 하중변위 이력곡선

그림 4는 각 실험체에 따른 하중-변위이력곡선을 보여주고 있다. 그림 4(a)는 주철근 겹침이음이 없는 비내진설계된 교각(N2C-SP00-L)의 실험결과로 교축방향 가력변위크기 4.0%(112 mm) 이후 횡구속력 부족으로 인하여 연성이 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 극한점 이전 최종 파괴시 가력변위크기 6.0%(168 mm)에서는 피복콘크리트가 완전히 탈락되고 교축직각 방향 재하시에 전단으로 파괴되었다. 그리고 그림 5(b)은 현행 내진 규정의 50%, 비내진 교각의 1.87배인 0.433% 횡구속철근비를 갖는 한정연성 실험체(L2C-SP00-L) 결과로 가력변위크기 6.0% (168 mm) 주철근이 파단되

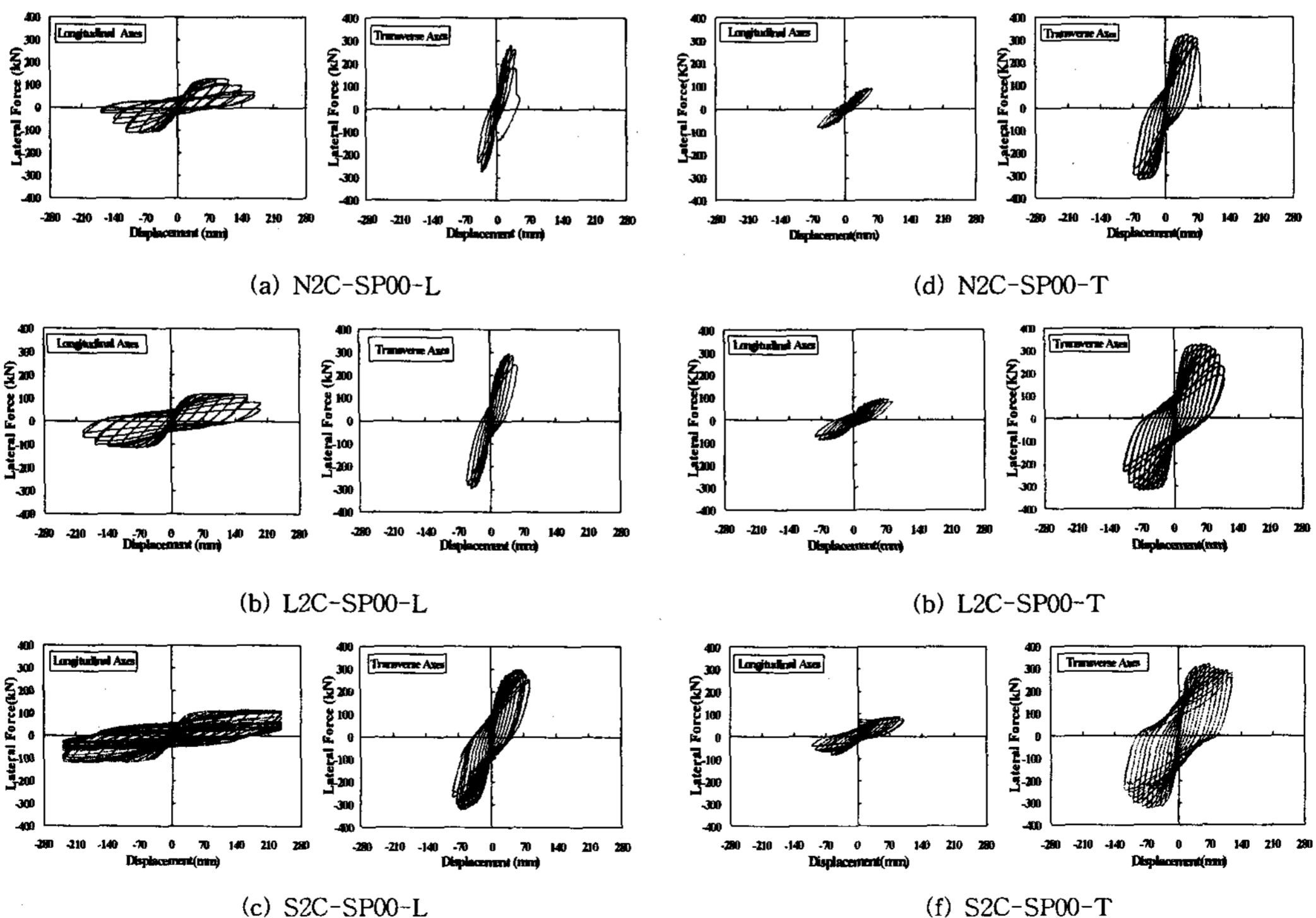


그림 4 하중-변위 이력곡선

기 전까지는 하중의 저하 없이 연성이 비내진 실험체에 비하여 증가되는 것을 알 수 있다. 그림 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 250 mm로 인하여 가력변위크기 8.5%(238 mm)를 파괴시까지 반복재하였다.

비내진 설계된 교각(N2C-SP00-T) 그림 4(d)의 경우는 극한점도달 이전에 횡구속철근의 부족으로 인하여 교축직각 방향재하시에 전단으로 파괴되었다. 한정연성으로 설계된 교각(L2C-SP00-T) 그림 4(e)의 경우 가력변위크기 10.0%(100 mm)에서 주철근이 파단될 때 하중의 급격한 감소를 볼 수 있다.

주하중방향에 관계없이 횡구속 철근비가 증가 할수록 파괴진행이 지연되어 항복변위에 대한 극한변위 값인 변위연성도가 크게 나타났다. 즉, 횡구속철근비가 증가 할수록 실험체는 더 좋은 연성 거동을 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.

### 3.2 변위연성도

항복점과 극한점은 그림 5와 같이 정의하였으며 그 결과를 표 2에 정리하였다. 분석결과 표 2와 같이 주철근 겹침이음이 없이 비내진설계된 경우 이전 연구<sup>1),2)</sup>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 이전연구<sup>2)-4)</sup>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 값을 나타냈다. 이는 내진설계시 2축 반복하중을 받는 경우도 고려해야 한다는 것을 의미한다. 내진 실험체(S2C-SP00-L)의 경우 그 연성도가 매우 뛰어나 요구연성도를 충분히 만족하는 것을 알 수 있으나, 정확한 변위연성도를 구하지는 못하였다. 즉, 이 결과를 통하여 중저진지역에 속하는 우리나라에 적합하도록, 현행 내진규정을 보다 완화시킨 횡구속철근비를 갖도록 개정할 필요가 있다고 판단된다.

주하중 방향이 교축직각방향인 실험체는 교축방향인 실험체와 같이 횡구속철근비가 증가할수록 연성도가 증가하는 값을 나타내고 있다. 한정연성실험체(L2C-SP00-L,T)의 경우 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.

주하중 방향이 교축직각방향인 실험체가 교축방향을 주하중방향으로 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.

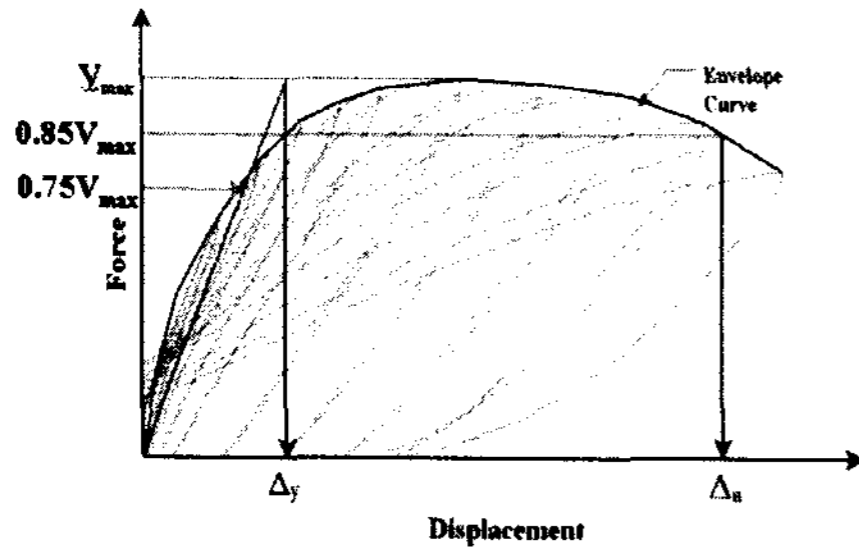
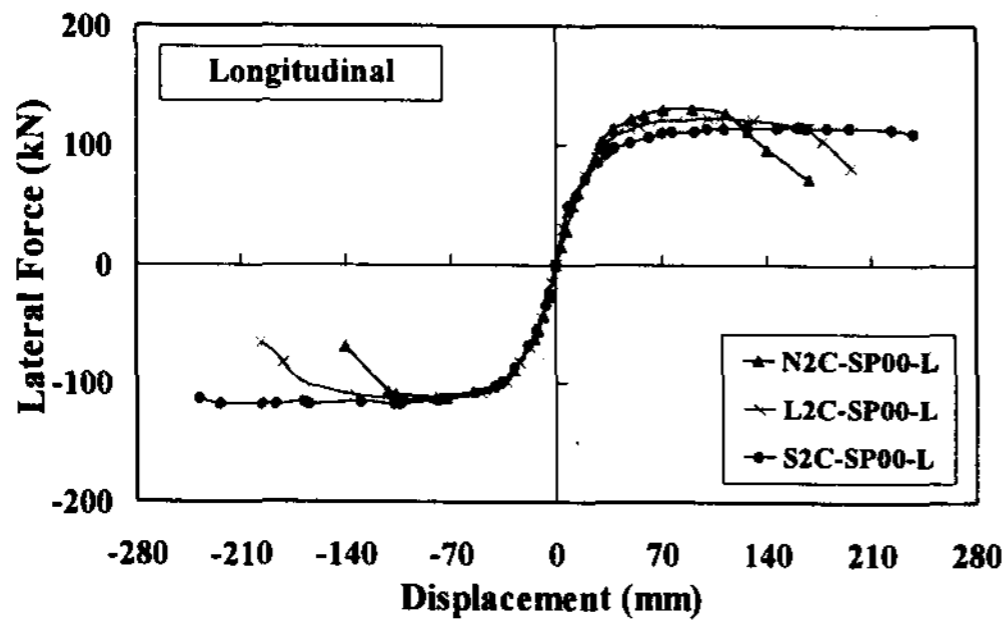


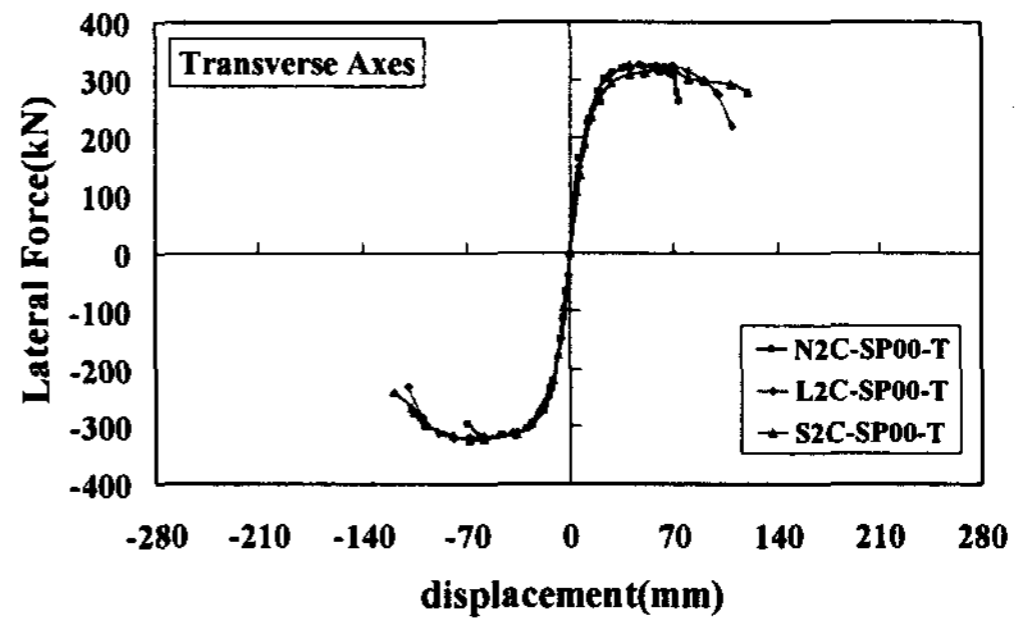
그림 5. 항복변위와 극한변위의 정의

표 3. 변위연성도

Specimen	Yield	Ultimate	Displacement Ductility	
	Displacement (mm)	Displacement (mm)		
L series	N2C-SP00-L	37.0	126.4	3.5
	L2C-SP00-L	36.8	176.9	4.8
	S2C-SP00-L	38.7	> 238.0	> 6.2
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



(a) 교축방향(L-series)

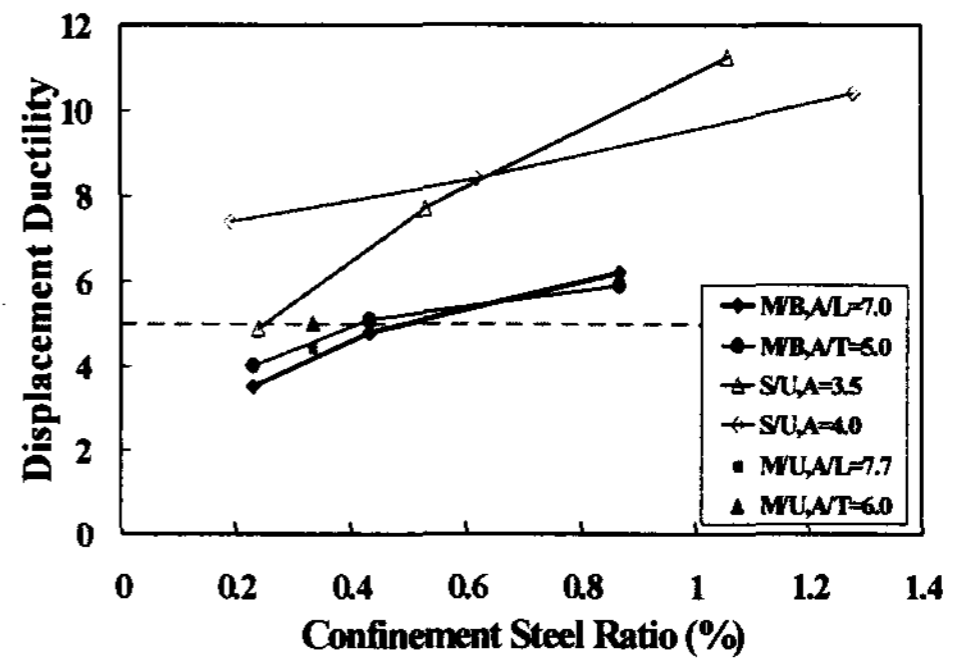


(b) 교축직각방향(T-series)

그림 6. 하중-변위 포락곡선

### 3.3 횡구속철근비와 연성도와의 관계

그림 7은 주철근겹침이 없는 실험체들의 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 주하중방향이 교축직각방향인 경우 상하부에 소성힌지가 발생하면서 기동전면으로 힘을 분배시키기 때문이다. 내진 실험체(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 교축직각방



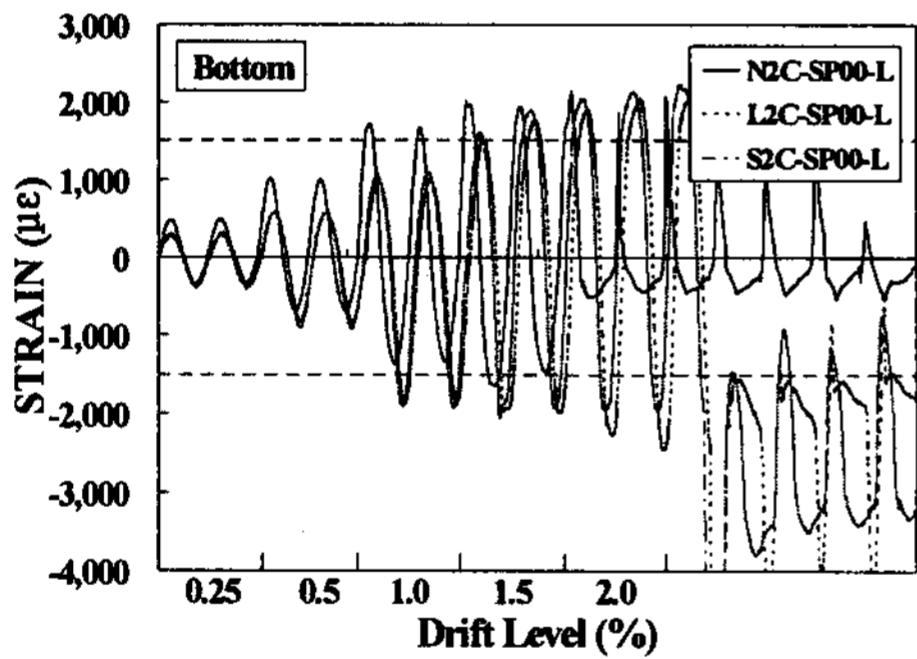
A : Aspect ratio, S : Single column, M : Multi cloum  
 U : Unidirection loading, B : Bidirectional loading  
 L : Longitudinal Loading, T : Transverse Loading

그림 7. 주철근겹침이 없는 실험체들의 변위연성도비교

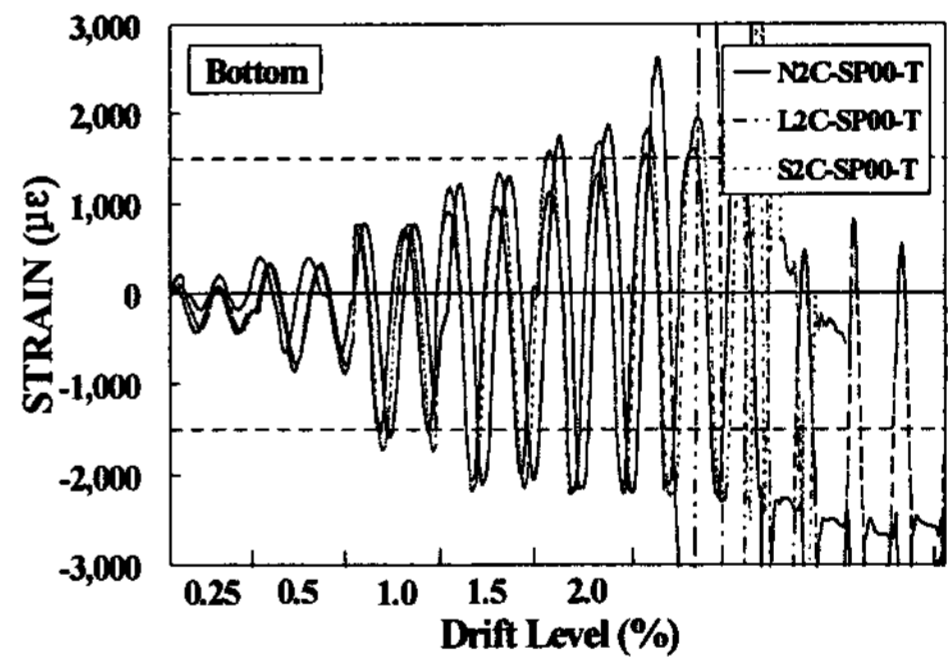
향인 실험체가 더 좋은 연성도를 나타낼 것으로 예상된다. 또한 일축반복하중을 가한 다주실험체와 이축반복하중을 가한 다주실험체를 비교해보면 많은 차이는 보이지 않지만 일축반복하중을 준 실험체가 더 좋은 연성도를 나타내고 있다. 주하중방향이 교축방향인 2주형 실험체 M/B,A/L와 M/U,A/L를 비교해보면 이축하중을 준 실험체(M/B,A/L)가 일축하중을 준 실험체(M/U,A/L)보다 8%의 변위연성도 감소를 가져왔다. 또한 주하중방향이 교축직각방향인 실험체 역시 이축하중을 준 실험체(M/B,A/T)가 일축하중을 준 실험체(M/U,A/T)보다 4%의 변위연성도 감소가 발생하였다. 이는 이축방향 하중을 가함으로써 손상도가 증가되어 연성도의 감소를 가져오는 것으로 판단된다.

### 3.4. 변형률분석

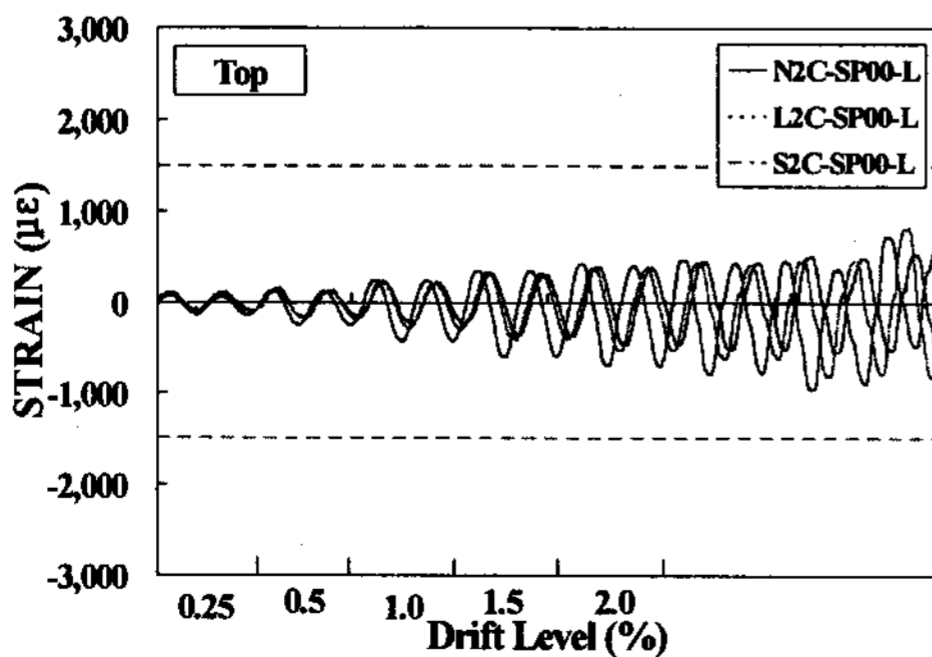
다음 그림 9는 교축직각방향 하중재하시 교각 하단 및 상단에 부착된 게이지중 가장 큰 값을 보이는 게이지를 선별하여 주철근의 변형률 변화를 보여주고 있다. 주철근의 항복변형률은 실험체 설계시 가정한 철근(SD30)의 강도와 탄성계수(200 GPa)을 가정하여 1,500  $\mu\epsilon$ ~2,000  $\mu\epsilon$ 으로 판단하였다. 분석결과 그림 9(a)에서 보이는 바와 같이 모든 실험체가 실험체의 하단부에서 가력변위크기 1.5%~2.0%에서 push/pull 재하시 최외단 주철근이 항복변형률을 넘어서고 있다. 이는 3.2절에서 분석한 항복변위 발생시점인 가력변위크기 2.0%이전에 주철근이 항복하는 것으로 나타났다. 이는 최외단 주철근이 항복변형률에 도달한다 하여도 구조물 전체가 항복하는 것은 아니라는 것을 의미하는 것이다. 교각 상부의 주철근 변형률을 살펴보면 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 주하중방향이 교



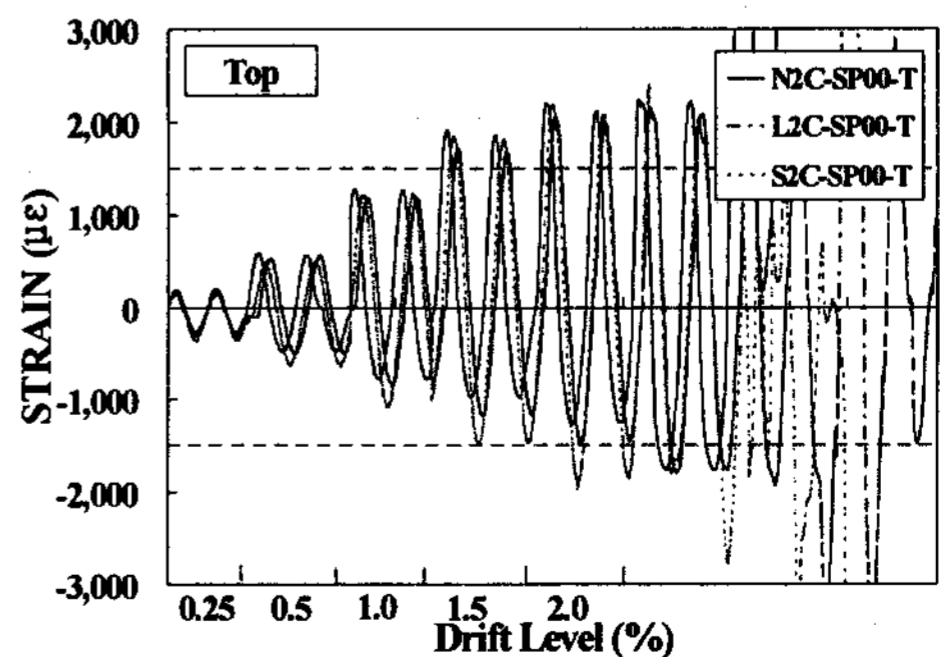
(a) 교축하부



(b) 교축직각하부



(A) 교축상부



(b) 교축직각상부

그림 9 교축직각방향의 주철근변형률



축방향인 실험체와 달리 교축직각방향인 실험체는 교각의 하부뿐만아니라 상부에서도 가력변위크기 2.0%이전에 주철근이 항복하는 것으로 나타났다. 내진실험체(S2C-SP00-L)의 경우 변형율이 너무 크게 측정되어 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

- 1) 주 하중방향이 교축방향인 경우의 이주형 교각의 내진거동은 단주교각의 파괴거동과 유사하게 교각하부에서만 파괴되었지만 주 하중방향이 교축직각 방향인 실험체의 경우 교각상부에도 소성힌지부가 발생하여 균열이 발생하고 파괴되었으며 이는 철근변형율의 분석결과에서도 확인 할 수 있었다.
- 2) 횡구속 철근비를 증가시킴에 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 요구연성도를 충분히 만족하는 것으로 나타나 중진지역에 적합한 내진 횡구속 철근비 규정은 이축반복하중에 의한 연구 결과를 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(과제번호:R11-1997-045-12005-0)의 지원 및 현대건설기술연구소 구조실험동 관계자의 협조로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 정영수, 박창규, 이은희, “지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도 평가”, 한국지진 공학회, 7권, 3호, 2003, pp.79~88.
2. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, “주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 대한토목학회, 22권, 5A호, 2002, pp.1193-1202.
3. 정영수, 이재훈, 김재관 등, “고속도로 기존 교량의 유형별 내진 성능평가를 위한 실험적 연구”, 한국도로공사, 2001.
4. 이재훈, 김광수, 배성용, “지진하중에 대한 고강도콘크리트 나선철근교각의 한전연성거동”, 대한 토목학회, 23권, 3A호, 2003, pp.385~.395.
5. 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.