

이축반복하중을 받는 2주형 철근콘크리트 교각의 내진 연성도

Seismic Ductility of RC Circular Column-Bent Piers under Bidirectional Repeated Loadings

박창규* 이범기** 송희원** 정영수***
Park, Chang Kyu LEE, Bum Gi Song, Hee Won Chung, Young Soo

ABSTRACT

Seismic performance of reinforced concrete(RC) column bent piers to bidirectional seismic loadings was investigated experimentally. RC column bent piers represent one of the most popular forms of piers used in highway bridges. Further to series of previous experimental researches for the performance of single bridge columns subjected to seismic loadings, four column bent piers were constructed in 400 mm diameter and 2,000 mm height. Each pier has two circular supporting columns. These piers were tested under lateral load reversals with axial load of $0.1f_{ck}A_g$. Bidirectional lateral loadings were applied. The test parameters included : different transverse reinforcement contents and lap-spliced longitudinal reinforcing steels.

Test results indicate that lap-splices of longitudinal reinforcing steels have significantly influence on hysteretic response of column bent piers. Column capacity changed with the level of transverse confinement, and bidirectional repeated loadings induced more strength and stiffness degradation than unidirectional repeated loading.

1. 서론

우리나라는 과거 지진기록이나 최근의 지진활동으로부터 잠정적으로 중진 지역으로 분류되고 있지만 짧은 내진연구연혁 및 피해사례부족으로 강진지역의 규정을 검증없이 도입하여 적용하고 있다. 따라서 국내지진특성을 고려한 중진지역에 알맞는 내진설계규정개발이 시급하게 요구되고 있다. 이에 많은 연구자들이 최근 몇 년 동안 내진에 관하여 많은 연구를 수행하여 좋은 성과를 올리고 있으나 지진시 피해가 큰 교량교각의 경우에는 실험여건상 일방향 반복하중을 받는 단주에 한정되어 연구가 진행되고 있다. 그러나 고속도로상의 교각은 거의 대부분이 다주교각으로 이루어져 있으며, 또한 지진발생시 지진하중은 매우 불규칙한 하중으로서 어느 한 방향으로만 작용하지 않는다. 그럼에도 불구하고 다축하중을 받는 다주형 교각에 대한 연구는 현재까지는 매우 미흡한 실정이다.

우리나라의 기존 비내진 설계된 현재 공용중인 교각의 경우 주철근 겹침이음을 가지고 있는 것이 현 실정이다. 정영수¹⁾의 형상비 4.0 철근 콘크리트 단주 교각의 내진성능 연구결과에 의하면 주철근 겹침이음이 있는 경우 지진시 주철근의 슬립에 의하여 내진성능이 크게 저하되는 것으로 보고되고 있으며, 주철근 겹침이음이 없는 비내진의 경우에는 휨파괴가 되나 요구연성도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 이전의 일축반복하중을 받는 단주에 관한 연구에 이어 과거 주철근 겹침이음을 가지고 있으며 2축반복하중을 받는 비내진 설계된 2주형 교각의 내진성능과 다양한 횡구속 철근비에 따른 내진성능을 실험적으로 파악하고자 하였다. 실험변수로는 횡방향 구속철근비와 주철근 겹침이음으로서 비내진 설계된 교각의 경우 주철근 겹침이음 유무를 변수로 하였고, 주철근 겹침이음이 없는 비내진 설계된 교각과 현행 도로교 설계기준에 따른 내진설계된 교각과 내진설계의 50%에 해당하는 횡방향

* 정희원 · 중앙대학교 토목공학과, 박사수료
** 정희원 · 중앙대학교 토목공학과, 석사과정
*** 정희원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수

구속철근비를 갖는 한정연성실험체의 내진성능을 파악하고자 하였다.

2. 실험계획

본 연구는 내진설계가 수행되지 않은 기존 다주교각의 거동특성을 파악하고 현행 내진설계기준의 철근상세에 비하여 대폭적으로 완화된 철근상세를 갖는 다주교각의 내진성능을 확인하는 것에 목표를 두고 실험을 수행하였다.

교각실험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수 25mm 골재의 레디믹스트 콘크리트를 사용하였으며 기둥본체에 타설된 콘크리트의 28일 평균압축강도는 28 MPa을 얻었다. 그리고 주철근은 SD30인 D13을 사용하였고 띠철근은 SD35인 D6을 사용하였다. 실험체는 그림 1과 같이 단면지름이 0.4m, 기둥높이 2m이며 횡방향하중 가력높이는 코핑부 및 받침 높이까지 고려한 2.8m인 휨실험체로 설계하였다. 비내진 교각의 내진성능을 조사하기 위하여 표 1에서 보는 바와 같이 비내진시험체 2기(겹침이음 50%, 0%)와 한정연성시험체와 내진시험체 각 1기를 각각 제작하였다. 주철근 겹침이음에 있는 경우 겹침이음 길이는 과거 교각의 주철근을 압축철근으로 고려한 것을 고려하여 압축철근의 이음식을 적용하였으며 그 길이는 300mm이고, 이음철근이 기초에 묻히지 않도록 배근하였다.

표 1 실험체상세

실험체명		주철근		횡방향철근		축력 (kN)
		철근비 (%)	겹침이음 (%)	철근비 (%)	간격(mm) PHR / NPHR*	
Nonseismic Design	N2C-SP00-L	1.61%	0	0.231	150 / 150	$2 \times 0.1f_{ck}A_g$ (600)
	N2C-SP50-L		50			
Limited Ductile Design	L2C-SP00-L		0	0.433	80 / 100	
Seismic Design	S2C-SP00-L			0.867	40 / 80	

* PHR : 소성현지구간, NPHR : 비소성현지구간

3. 실험방법

본 실험에서는 그림 1과 같이 축방향력과 교축 및 교축직각방향의 이축방향으로 횡하중을 재하하도록 계획되었다. 실험체의 상부에는 프레임을 설치하여 축방향력과 2방향의 횡하중을 재하할 수 있도록 설계되었으며 코핑부와 완전일체가 되어 거동할 수 있도록 하였다. 축방향력은 $0.1f_{ck}A_g$ 에 해당하는 600 kN을 가력하여 각 교각에 300 kN이 재하되도록 하였다. 그리고 교축방향의 하중은 2개의 1,000kN Actuator를 교축직각방향의 하중은 500kN의 Actuator를 가력력에 부착하여 재하하였다.

실험수행후의 시험체의 거동을 분석하기 위한 측정장비로 하중과 변위값은 Actuator에 내장되어 있는 Load Cell을 이용하였다. 그리고 그림 2는 실험체의 변위, 곡률, 그리고 철근의 변형률을 측정하기 위하여 교축방향과 교축직각방향에 설치한 계측기의 위치를 보여주고 있다.

그림 3은 횡방향 하중의 재하패턴을 보여주고 있다. Drift Level로 표현된 하중이력은 기둥의 유효 길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로, 하중의 주방향인 교축방향은 기초상단에서 가력부까지 높이 2.8m의 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$... 단계로 진행되어 파괴시까지 변위제어로 진행하였다. 또한 부방향인 교축직각방향은 교축방향변위의 30%에 해당하는 값으로 설정되었다.

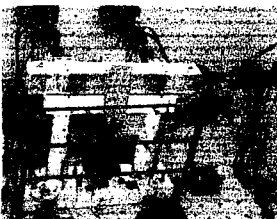


그림 1 실험전경

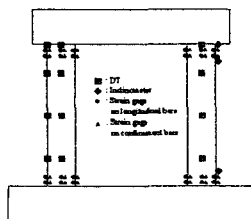


그림 2 계측계획

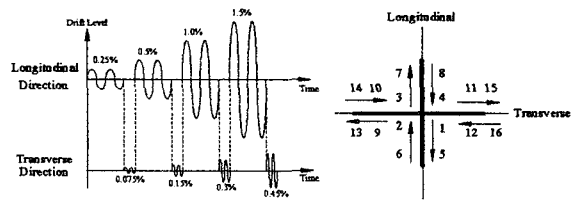


그림 3 하중재하형태

4. 실험결과

다음 그림 4는 각 하중방향에 따른 실험결과로서 주방향인 교축방향과 부방향인 교축직각방향의 실험결과를 보여주고 있다. 모든 실험체의 초기균열은 Drift level 0.25%에서 약 0.5D 높이에서 발생하였으며, 3.0%에서 지압으로 인한 압축수직균열이 발생하였다. 그림 4(a)의 경우는 주철근 겹침이음을 50% 가지고 있는 실험체(N2C-SP50-L)의 하중-변위 이력곡선으로서 교축방향 Drift level 3.0% 이후 주철근의 슬립으로 인하여 하중이 급격히 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 이 시점부터 교축직각방향의 하중도 저하되었다. 그림 4(b)는 주철근 겹침이음이 없는 비내진 설계된 교각(N2C-SP00-L)의 실험결과로 교축방향 Drift level 4.0% 이후 횡구속력 부족으로 인하여 연성이 저하되는 것을 알 수 있다. 또한 극한점 이후 최종 파괴시 Drift level 6.0%에서는 피복콘크리트가 완전히 탈락되고 횡구속철근 즉 전단철근의 부족으로 인하여 교축직각 방향 재하시에 전단으로 파괴되었다. 그리고 그림 4(c)는 현행 내진 규정의 50%, 비내진 교각의 1.87배 횡구속철근비를 갖는 실험체(L2C-SP00-L)의 결과로 Drift level 6.0% 주철근이 파단되기 전까지는 하중의 저하없이 연성이 비내진 교각에 비하여 증가되는 것을 알 수 있다. 그림 6(d)는 현행 도로교 설계기준의 내진규정에 따라 설계된 교각(S2C-SP00-L)의 실험결과로서 연성능력이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 그림 6(d)의 좌측 즉 교축방향의 결과에서 나타나듯 1,000kN Actuator의 최대가력 변위인 250mm에도 하중이 저하되지 않아 교축방향의 경우 Drift level 8.5%(238mm)를 파괴시까지 반복재하하였다. 또한 교각 상부는 내진시험체 S2C-SP00-L만 파괴가 탈락하였다. 그림 5는 교각 하부의 0.5D(20cm)높이 단면의 교축방향에 대한 모멘트-곡률 이력곡선으로 그림 4의 교축방향에 대한 하중-변위 이력곡선과 매우 유사함을 보여주고 있다.

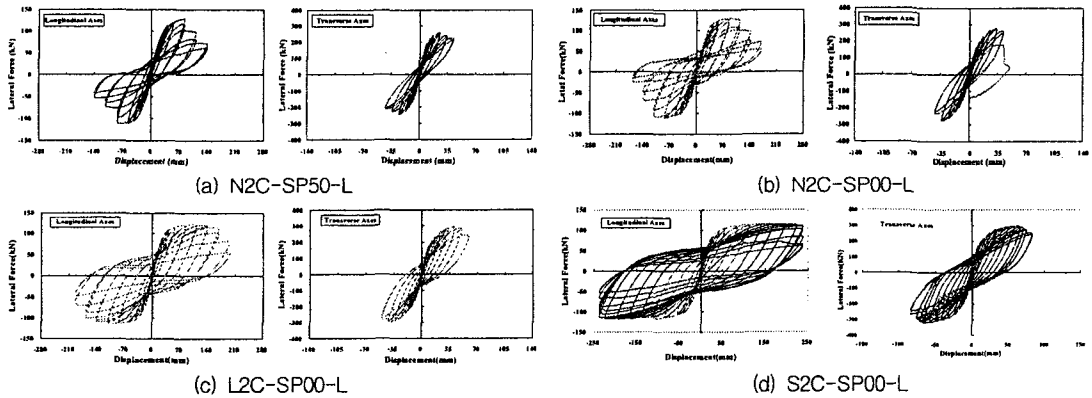


그림 4 하중-변위 이력곡선

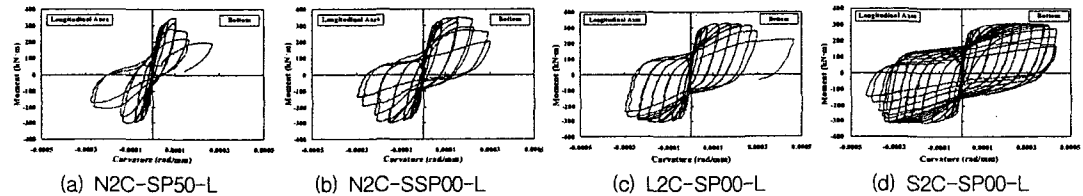


그림 5 모멘트-곡률 이력곡선

실험결과인 변위 및 곡률연성도를 그림 6과 그림 7 및 표 3에 비교 정리하였다. 주철근 겹침이음이 없는 비내진설계된 경우 이전 연구^{1,2)}에서는 일축반복하중을 받을시 요구변위연성도를 만족하는 것으로 보고하고 있으나, 본 연구에서 이축반복하중을 받는 비내진 실험체(N2C-SP00-L)는 요구변위연성도에 상당히 미치지 못하는 것으로 나타났다. 더욱이 주철근 겹침이음이 있는 N2C-SP50-L의 경우는 변위연성도가 가장 작게 나와 내진보강의 필요성을 다시금 상기시키고 있다. 그리고 주철근 겹침이음이 없는 경우에는 횡구속철근비가 증가할수록 변위연성도가 증가하는 것으로 이전의 일축반복하중을 받는 단주형 교각의 연구결과와 유사하게 나타났다. 내진 실험체(S2C-SP00-L)의 경우에는 그 변위연성도가 매우 뛰어나 요구변위연성도를 충분히 만족하는 것을 알 수 있으나 actuator의 가력한계로 인하

여 정확한 변위연성도를 구하지는 못하였다. 그러나 한정연성 실험체(L2C-SP00-L)의 경우에는 기존 연구결과와 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 이전연구¹⁾에 따르면 일축반복하중을 받는 단주결과를 보면 현행 내진규정의 30%만의 횡구속철근비에도 요구연성도를 만족하는 것으로 보고되고 있으나 본 실험체(L2C-SP00-L)는 현행규정의 50%에 해당하는 횡구속철근비로도 요구연성도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 일축이 아닌 이축반복하중을 받음으로서 손상도가 증가하여 연성이 저하되는 것으로 판단된다. 또한 그림 7은 모멘트-곡률 포락곡선으로 이 또한 그림 6의 하중-변위 포락곡선과 유사한 형태로 나타났다. 비내진 설계된 교각의 경우 Eurocode에서 제시하고 있는 한정연성요구 곡률연성도 7을 만족하지 못하였으며 내진시험체의 경우에는 완전연성요구곡률 13을 넘는지는 정확히 측정하지는 못하였으나 표 2의 실험결과를 미루어 추측해볼 때 만족할 수 있으리라 판단된다 그리고 요구변위연성도 5를 근소한 차이로 만족시키지 못한 한정연성시험체(L2C-SP00-L)의 경우 곡률연성도는 Eurocode에서 제시한 한정연성요구곡률연성도 7을 만족하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 2축하중을 받는 요구연성도를 만족하기 위한 요구횡구속 철근비는 0.495%이상이 되어야 하며, 이는 현행규정의 60%에 해당하는 철근비이다.

표3 실험결과

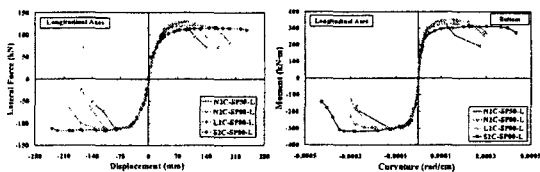


그림6 하중-변위 포락곡선

Specimen	항복		극한		연성도	
	변위 (mm)	곡률 (rad/mm)	변위 (mm)	곡률 (rad/mm)	변위	곡률
N2C-SP50-L	39.7	3.6E-5	99.7	1.36E-4	2.51	3.74
N2C-SP00-L	37.0	4.6E-5	126.4	2.55E-4	3.42	5.54
L2C-SP00-L	36.8	3.3E-5	176.9	2.93E-4	4.81	8.87
S2C-SP00-L	38.7	3.7E-5	238.0	4.36E-4	>6.15	11.77

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 교축직각 방향의 반복하중에 의해 교각상부에도 휨균열이 발생하였으나, 주하중방향이 교축방향인 경우의 2차형 교각의 내진거동은 단주교각의 파괴거동과 유사하다.
2. 주철근 겹침이음이 없는 경우 일축반복하중을 받는 단주는 요구연성도를 만족하는 경우도 있었지만, 2축반복하중을 받는 경우에는 요구연성도에 상당히 못 미치는 것으로 나타났다. 더욱이 주철근 겹침이음이 있는 비내진 교각의 경우는 주철근 겹침이음이 없는 경우보다 연성도가 26% 낮게 나타나 내진보강이 시급한 것으로 일축반복하중을 받는 경우의 연구결과와 동일하게 나타났다.
3. 횡구속 철근비를 증가시킨 한정연성 교각의 경우 비내진 교각보다 연성도가 41% 높게 나타났다. 그러나 일축 반복 하중을 받는 경우 횡구속철근비가 현행 내진규정의 30% 만으로도 요구연성도를 만족하였으나, 이축 반복하중을 받는 경우에는 현행 내진규정의 50%의 횡구속철근비에도 요구연성도를 만족하지 못하였다. 따라서 중진지역에 적합한 내진설계식 검토시 이축반복하중에 의한 연구 결과를 고려해야 할 것으로 판단된다.
4. 2축하중을 받는 교각의 경우 0.495% 이상의 횡구속 철근비가 있어야 요구연성도를 만족하며 이는 현행 내진규정의 60%에 해당하는 횡 철근비이다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(과제번호:R11-1977-045-12005-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정영수, 박창규, 이은희, “지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제3호, 2003, pp.79~88.
2. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, “주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진 성능평가”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제5A호, 2002, pp.1193~1202.
3. 정영수, 이재훈, 김재관 등, “고속도로 기존 교량의 유형별 내진 성능평가를 위한 실험적 연구”, 한국도로공사, 2001.