

주철근 겹침이음 및 횡철근 상세에 따른
철근콘크리트 다주교각의 거동특성에 관한 실험적 연구
An Experimental Study on the Behavior of Reinforced
Concrete Multi-Column Piers with Different Longitudinal and
Transverse Reinforcement Details

김재관* 김익현** 김정환*** 조대연****
KIM, Jae-Kwan KIM, Ick-Hyun KIM, Jung-Han Cho, Dae-Yeon

ABSTRACT

This study is performed to investigate the behavior of multi-column piers and to evaluate the seismic performance. In this study, 3 types of scale model piers with 2-column are designed and tested by quasi-static load in both longitudinal and transverse directions. Each type of model consisting of 2 specimens has different reinforcement details in the lap splice of longitudinal bars and amount of transverse reinforcements.

This paper reports that the ductility of the model in transverse direction is rather higher than in longitudinal direction because of formation of several plastic hinges and that the ultimate displacement and the energy absorption capacity are enhanced by using continuous longitudinal bars instead of lap-splice ones. And it is confirmed that relatively large amount of ductility can be achieved by providing sufficient lap-splice length and transverse reinforcements with end hook even if longitudinal bars are lap spliced in the base of pier.

1. 서론

지진력과 같은 횡하중을 받는 교각에 대한 거동 특성에 대하여 많은 연구가 이루어졌으며 최근에도 많은 연구 결과들이 나오고 있다. 그러나 이러한 교각의 내진성능 평가와 관련하여 수행된 실험은 대부분 단주교각을 대상으로 하였다. 이는 현존하는 단주교각의 수가 다주교각에 비해 훨씬 많으므로 내진평가 대상에서 우선적으로 다루어졌기 때문이다. 다주교각의 경우, 단주와

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

** 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정

**** 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, 정회원

다른 거동특성을 보이는데, 교축방향에 대해서는 지진과 같은 수평력이 작용하면 다주가 동일하게 거동하여 단주와 같은 거동특성을 보일 가능성이 매우 크지만, 교축직각방향에 대해서는 가구시스템을 구성하는 부재의 여러 곳에 소성힌지가 형성되며 프레임 거동을 하므로 파괴유형을 단주에 비해서 예측하기 어려운 점이 있다. 이 논문에서는 비교적 강성이 큰 캡빔을 가지는 다주교각에 대하여 기둥의 휨과괴에 의한 거동 특성에 대해 알아보려고 하며, 교축방향과 교축직각방향재하 시험을 같이 수행하여 재하방향에 따른 차이를 확인하는데 중점을 둔다. 또한 겹침이음 및 횡철근 비를 달리하는 시험체를 제작하여 기둥의 철근 상세에 따른 거동특성의 차이를 확인하는 것을 병행하도록 한다.

2. 실험의 개요

2.1 시험체 형상

시험체는 기존 설계된 다주 교각인 소래교를 1/4로 축소하여 제작하였다. 기둥의 단면은 원형이고 지름은 50cm이며 기둥의 높이는 3m이다. 하중재하 위치가 기둥 하단에서 385cm 높이이므로 교축방향재하시의 형상비는 7.7이고 교축직각방향으로는 3이다. 시험체에 사용된 주철근은 D10 철근을 사용하였고 횡철근은 상사를 고려하여 4mm 철선을 열처리 가공하여 사용하였다. 콘크리트는 설계강도가 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 것을 사용하고, 시험체의 횡철근 간격이 좁기 때문에 골재는 눈금 20mm 체로 걸러서 사용하였다. 시험체의 제원은 표 1과 같고 시험체의 형상은 그림 1과 같다.

표 1 시험체의 제원

시험체명		RH-NS	RH-SL	RH-SC
재료강도	콘크리트	$240\text{kg}/\text{cm}^2$		
	철근	SD30		
지름(m)		0.5		
높이(m)		3.0		
주철근	지름	D10		
	철근비(%)	1.174		
	겹침이음	100%	50%	없음
횡철근	지름	4mm		
	Spacing	37.5mm	20mm	30mm
	철근비(%)	0.268%	0.503%	0.335%
축력		$0.052 f_{ck} A_g (49\text{ton})$		

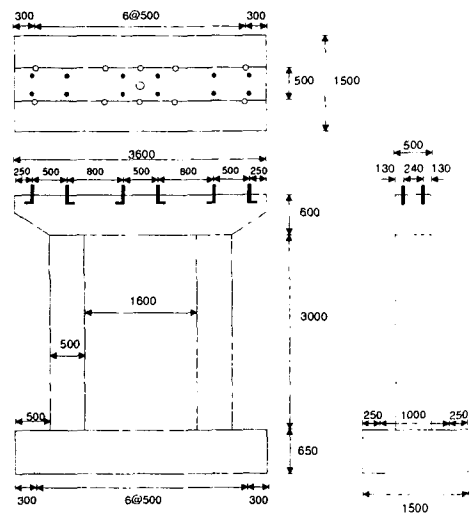


그림 1 시험체 단면도

그림 2와 같이 시험체별로 하단의 33cm 높이까지 주철근 겹침이음 여부를 달리하고, 상 하단의 소성힌지부인 75cm 높이까지 횡철근비의 변화를 두어 제작하였다. 단면형상은 횡철근은 2개의 반원을 겹침이음하며 Cross Tie는 횡철근이 겹침이음 된 부분에 두 개를 평행하게 연결한다. 같고

리는 내진설계 기준⁽¹⁾에 따라 한쪽은 135°, 다른 한쪽은 90° 각고리로 한다. 횡철근의 겹침이음 위치는 교축방향과 교축직각방향으로 번갈아가며 설치한다. 단면의 철근배근은 그림 3과 같다.

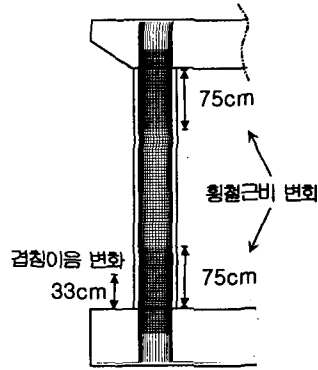


그림 2 교각 기둥의 철근 상세

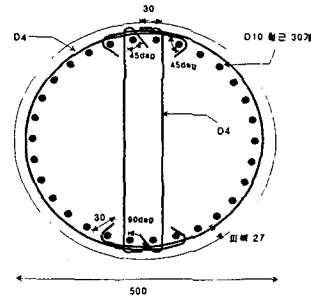


그림 3 교각 기둥의 단면 형상

2.2 시험체 구성

교축방향 및 교축직각방향의 거동특성을 파악할 수 있도록 2기의 시험체를 한 세트로 하여 시험체를 구성하였다. 각 세트는 철근상세의 차이에 의한 내진성능의 차이를 확인하기 위한 것으로 철근상세를 달리한 3세트(6기)의 시험체를 제작하였다.

기존 설계된 상세를 따라서 기둥 하단에 100% 주철근 겹침이음을 하고 동일한 철근비를 갖는 시험체를 제작하였다. 이에 대해 철근상세가 다른 2세트의 시험체를 제작하였고 이 중에 1세트는 교각의 소성현지역역내에 주철근의 겹침이음을 서로 번갈아 두었으며 횡철근은 현행 내진설계 규정에서 요구하는 량의 1/2을 설치하였다. 다른 1세트의 시험체는 주철근에 연속철근을 사용하여 겹침이음을 제거하였으며 횡철근은 주철근의 국부좌굴을 방지할 수 있는 최소량⁽²⁾을 설치하였다. 각 시험체의 특성은 표 2와 같다.

표 2 시험체의 구성

모델명	재하방향	시험체 특성	
		겹침이음	횡철근비
RH-NS-L	교축	100% 교각하단	기존상세 (0.268%)
RH-NS-T	교축직각		
RH-SL-L	교축	50% 교각하단	현 내진규정의 1/2 (0.503%)
RH-SL-T	교축직각		
RH-SC-L	교축	없음	국부좌굴 방지 (0.335%)
RH-SC-T	교축직각		

2.3 하중 재하 방법

축력은 위, 아래에 2축방향 힌지를 설치한 강봉을 유압잭으로 당기는 방식으로 하였다. 수평력

을 가하는 장치는 100tf 용량의 액추에이터(Actuator)를 사용하였으며 교축방향 재하시에는 비틀림이 발생하지 않도록 2기의 액추에이터를 설치하여 변위제어를 하였다.

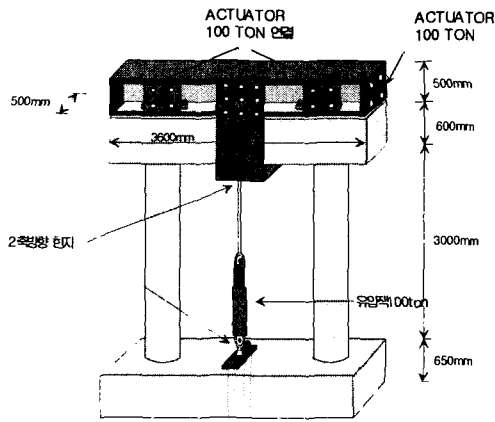


그림 4 축력재하장치 및 Actuator 설치 위치

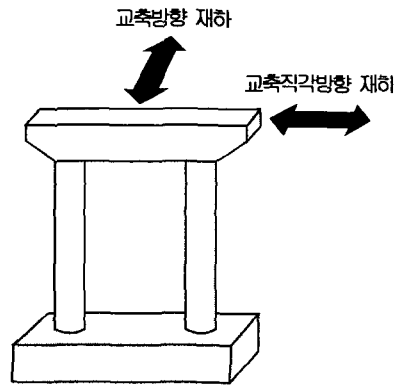
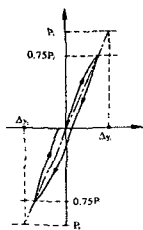


그림 5 재하방향

교각의 중심축 방향으로 일정한 축력을 재하한 상태에서 수평력을 정부 교대로 반복하여 재하한다. 이 실험에서는 우선 이론적인 수평내하력 P_i 를 계산하여 시험체에 $0.75 P_i$ 의 하중을 Push, Pull 방향으로 재하하여 얻은 변위 $\Delta'_{0.75}$, $\Delta''_{0.75}$ 를 이용하여 그림 6에서와 같이 항복변위를 구한다. 내진설계가 수행되지 않은 교각의 경우에는 조기파괴가 예상되므로 보다 정확한 연성도를 파악하기 위하여 $3\Delta_y$ 까지는 항복변위의 1/2을 하중진폭으로 한다. 반복회수는 각 사이클 당 2회로 한다. 그림 7은 하중재하 패턴을 나타낸다.



$$\Delta_y = \frac{(\Delta'_{0.75} + \Delta''_{0.75})}{2 \times 0.75}$$

그림 6 Δ_y 의 결정방법

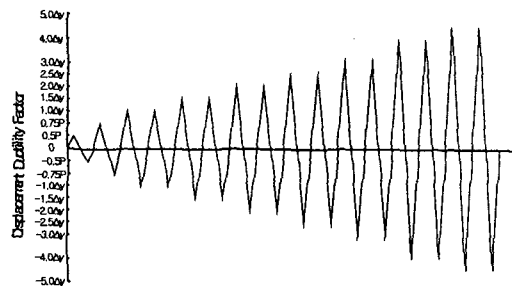


그림 7 하중재하 패턴

2.4 계측항목

(1) 횡변위 및 횡하중 측정

변위는 캡빔부에 LVDT(wire type)를 설치하여 측정하며 횡하중은 Actuator에 설치된 로드셀로 직접 측정한다. 각각은 1초에 하나의 Data를 기록하며 동일한 Data Logger로 읽어들이어 시간차가

없도록 한다.

(2) 곡률 측정

측정장치는 Clip Gauge를 사용하며, 측정하고자 하는 높이에 재하방향으로 기둥의 앞, 뒤 면에 한 쌍을 설치한다. 이를 이용하여 기둥의 양쪽 면의 변형을 측정한 후 곡률로 환산한다. 곡률을 측정하는 높이는 소성현저 영역이 교각 지름의 1.5배 이하에서 발생하는 것을 감안하여 10cm, 30cm, 50cm, 70cm의 위치에서 측정한다.

3. 실험 결과 및 분석

실험 결과 6기의 시험체 모두 휨파괴가 발생하였다. 교축방향재하시험체의 경우 약 1m 높이까지 수평균열이 고르게 발생하다가 Drift Level 3%에서 수직균열이 나타났다. 이후로 Spalling과 피복 탈락을 일으키다가 Drift Level 약 4.5%에서 철근이 파단되며 파괴가 일어났다. 교축직각방향으로는 상, 하단 약 70cm 까지 수평균열이 발생하였으며 하단은 Drift Level 약 2%이후에, 상단은 3%이후에서 박리가 시작되면서 하단에서의 주철근 파단에 의하여 파괴가 일어났다.

그림 8은 시험체의 하중-변위이력곡선을 나타내며 그림 9는 이들 포락선을 재하방향별로 비교한 것이다. 시험체의 변위연성도와 파괴시의 Drift Ratio 등을 정리하면 표 3과 같다. 시험체는 어느 정도의 휨연성을 보이면서 파괴에 이르고 거동에는 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 소성현저 구간에 주철근 겹침이음이 있으면 지진과 같이 수평력이 반복적으로 작용할 때 충분한 연성을 발휘하지 못하고 부차파괴가 발생하여 조기파괴로 이어지게 된다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 그러나, 본 실험에서는 이러한 거동특성이 나타나지 않았다. 이는 실교각에서는 겹침이음 위치가 소성현저영역 내에 놓이더라도 이를 시험체로 축소설계할 때 상용철근의 사용함으로써 축소율보다 굵은 주철근이 사용되고, 겹침이음부에서의 부차특성을 동일하게 유지하기 위하여 겹침이음길이를 주철근의 지름에 비례하게 설계함으로써 시험체에서는 겹침이음의 위치가 소성현저영역 밖에 놓였을 가능성이 크기 때문이다. 또한 선정된 시험체가 기존 설계된 다른 교각들에 비하여 비교적 횡철근비가 크고 내진설계기준에 따른 횡철근 같고리를 사용하여 콘크리트 심부구속력이 크게 작용하여 주철근 겹침이음부에서 부차파괴가 일어나지 않았을 가능성도 있다.

그러나, 겹침이음에 의해서 하단의 주철근비가 차이나고 횡철근비가 조금씩 다르기 때문에 이에 의한 다소의 거동차이는 있다. 교축방향으로 재하시에는 기둥 하단에서 파괴가 일어나므로 겹침이음에 의해 이 부분의 주철근비가 크면 그림 10에서와 같이 하단의 곡률이 작고 이에 따라서 파괴시의 변위가 작게 나온다. 그래서 겹침이음이 없는 시험체인 RH-SC-L이 연성이 가장 크다.

교축직각방향의 경우 기둥 상단에서의 회전 변위를 캡빔이 어느 정도 흡수해 주기 때문에 하단의 파괴가 먼저 일어나며 특히 횡하중에 의하여 압축력을 받는 기둥의 하단에서 먼저 파괴가 일어난다. Drift level 약 2.5% 에서 기둥 하단의 파괴가 일어나도 이력곡선이 급격히 떨어지지 않고 완만하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 교각의 파괴시점은 상단의 파괴 여부에 영향을 많이 받게된다. 즉, 상단 소성현저부의 횡철근비가 클수록 파괴가 천천히 일어나고 이는 그림 12에서 볼 수 있듯이 횡철근비가 가장 큰 시험체 RH-SL-T의 경우 에너지 흡수도가 파괴시점에서 더 높은 것을 알 수 있다.

표 3 각 시험체의 실험결과 정리

	교축방향재하 시험체			교축직각방향재하 시험체		
	RH-NS-L	RH-SL-L	RH-SC-L	RH-NS-T	RH-SL-T	RH-SC-T
Δ_y (Yield Displacement)	43.67 mm			19.21mm		
P_m (Maximum Lateral Force)	117.72 kN	118.14 kN	116.06 kN	287.93 kN	294.06 kN	277.06 kN
Δ_m (Displacement at P_m)	118.34 mm	132.97 mm	153.30 mm	56.25 mm	70.27 mm	63.58 mm
Δ_f (Displacement at Failure)		171.47 mm	193.46 mm	93.68 mm	101.69 mm	96.73 mm
Δ_f/L (Drift Ratio at Failure)		4.45 %	5.02 %	3.12 %	3.39 %	3.22 %
Δ_f / Δ_y (Displacement Ductility)		3.92	4.43	4.87	5.29	5.03

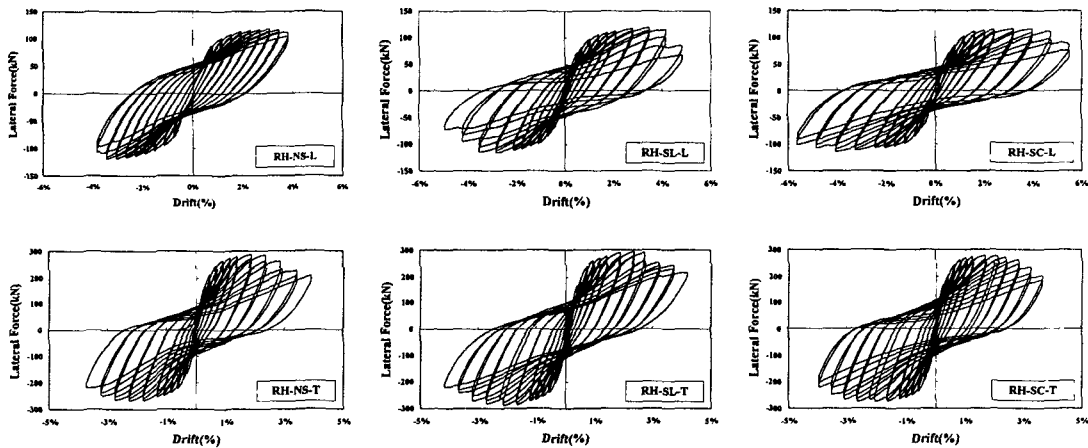
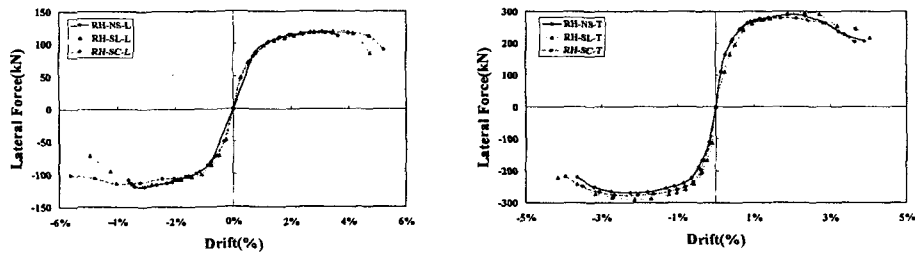


그림 8 시험체별 하중-변위 이력곡선



(a) 교축방향재하 시험체

(b) 교축직각방향 시험체

그림9 시험체별 하중-변위 포락곡선

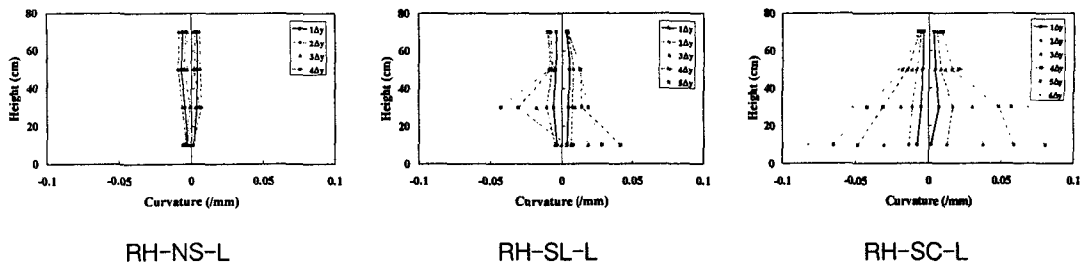


그림 10 교축방향재하 시험체 하단의 곡률분포

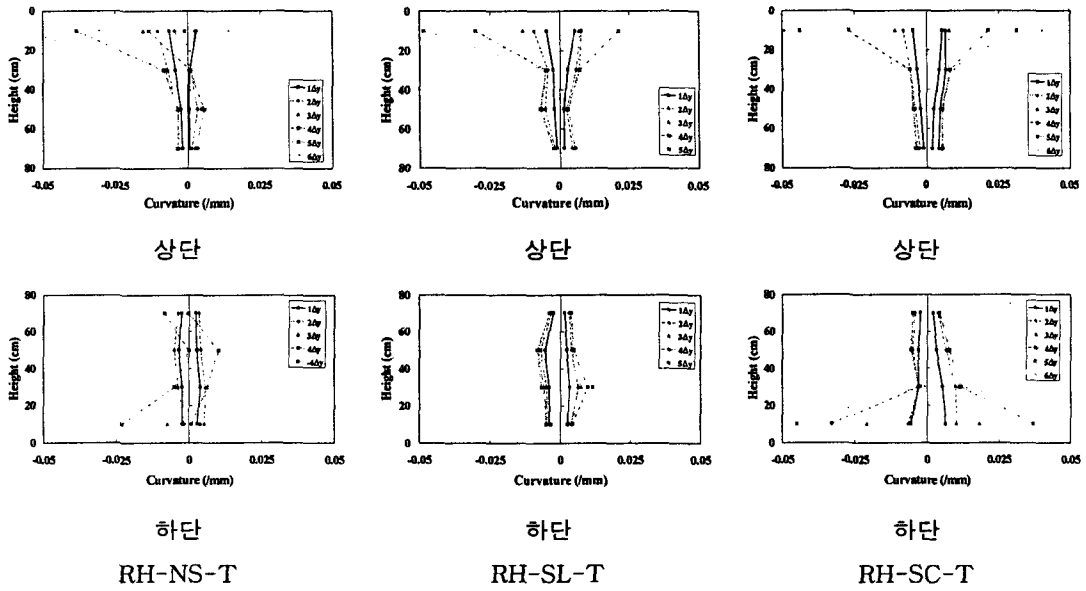
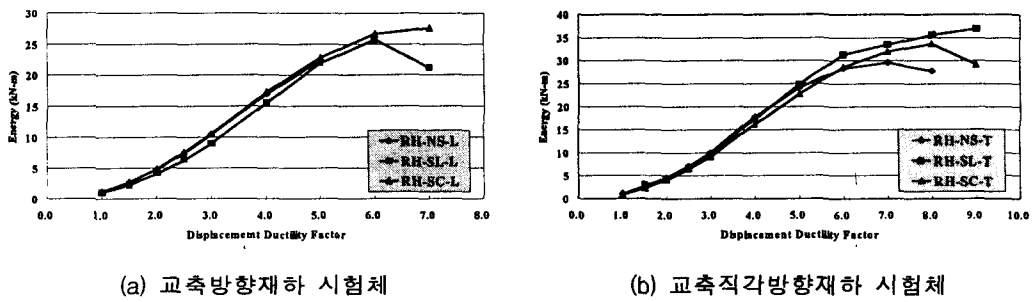


그림 11 교축직각방향재하 시험체 상, 하단의 곡률분포



(a) 교축방향재하 시험체

(b) 교축직각방향재하 시험체

그림 12 각 시험체의 에너지 흡수량

표 4 는 겹침이음이 없는 시험체인 RH-SC에 대한 하중재하 방향별 차이를 나타낸 것이다. 교축방향재하시 거동은 일반적인 단주교각의 거동과 유사하다. 그러나 교축직각방향 재하시에는 프레임 거동을 하므로 내하력이 크고 그 비율은 형상비 비율의 역수와 거의 유사하다. 교축방향재하시에는 소성힌지가 기둥의 상, 하단에서 모두 생기며 하단의 파괴가 먼저 계속 진행되어도 상단에서의 모멘트에 의한 저항력으로 인하여 내하력 감소가 지연되어 연성도가 교축방향재하시보다 더 크게 된다.

표 4 재하 방향에 따른 비교 (RH-SC)

	① RH-SC-L	② RH-SC-T	비 (②/①)
Aspect Ratio	7.7	3	0.39
Δ_y (Yield Displacement)	43.67 mm	19.21mm	0.44
P_m (Maximum Lateral Force)	116.06 kN	277.06 kN	2.39
Δ_f (Displacement at Failure)	193.46 mm	96.73 mm	0.5
Δ_f / Δ_y (Displacement Ductility)	4.43	5.03	1.14

4. 결론

이 연구에서는 철근 상세를 달리하는 3세트의 2축 다주교각 시험체를 교축방향 및 교축직각방향으로 재하하여 그 거동 특성을 살펴보았다. 주철근 겹침이음부에서의 파괴가 일어나지 않았기 때문에 전반적으로 연성도는 매우 우수하게 나타났다. 즉 교각의 하단에서 겹침이음을 허용하더라도 적절한 겹침이음길이와 횡철근량을 보유한다면 소요연성도를 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 철근 상세에 따른 경향은, 교축방향 재하시에는 겹침이음이 없는 시험체가 파괴시의 변위가 약간 더 크고, 교축 직각방향 시험체의 경우에는 횡철근비가 큰 시험체일수록 에너지 흡수도가 높음을 알 수 있다. 교축방향으로 하중이 재하되는 경우 다경간 연속교의 경우는 큰 관성력을 받기 때문에 내진성능을 만족하기 위해서는 상당한 연성도가 요구되며 동일한 단면적을 갖는 단주교각보다 단면2차모멘트가 작으므로 최대 내하력이 작으므로 횡강도 증가를 위한 보강이 동반되어야 한다. 그러나 교축직각방향의 경우에는 1경간에 해당하는 관성력만을 받고 최대내하력도 크며 연성도 우수하므로 충분한 내진성능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 겹침이음부 파괴가 일어나지 않은 원인에 대해서는 시험체 제작시 주철근 지름의 축소율과 횡철근에 의한 심부구속과 관련지어 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국도로공사의 “고속도로 기존 교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 실험을 위해서 많은 지원을 해주신 한국건설기술연구원 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 도로교설계기준, 서울, 2000.
2. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
3. Jaradat, O. A., McLean, D. I. and Marsh, M. L., "Performance of Existing Bridge Columns under Cyclic Loading-Part1: Experimental Results and Observed Behavior," *ACI Structural Journal*, V.95, No.6, November-December, pp.695-704, 1998.
4. Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. d., Jirsa, J. o. and Kreger, M. E., "Experimental Investigation of Seismic Repair of Lap Splice Failures in Damaged Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, V.96, No.2, March-April, pp.297-306, 1999.