

RC 다주교각의 철근상세에 따른 내진성능 평가

Seismic Performance of RC Multi-Column piers with Reinforcement Details

김재관^{*}
KIM, Jae Kwan

김익현^{**}
KIM, Ick Hyun

김정한^{***}
KIM, Jung Han

조대연^{****}
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 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. But because multi-column piers have small longitudinal stiffness, careful consideration is needed in case of multi-span continuous bridges.

1. 서론

철근콘크리트 교각은 횡하중이 작용하면 형상비 차이에 따라서 파괴 형상이 전단이나 휨파괴로 구분지어진다. 형상비가 작은 경우는 전단에 의한 취성적인 파괴가 일어나지만 형상비가 큰 경우에는 하단에서 소성힌지가 발생하여 휨파괴가 일어난다. 휨파괴의 경우 주철근 겹침이음 여부와 횡철근비에 따라서 연성에 큰 차이를 보이는데 특히 기존에 수행된 단주교각의 실험 결과를 볼 때 소성힌지영역에 겹침이음이 있으면 연성이 매우 작은 취성적인 거동을 보이게 된다. 다주교각에서는 단주에 비해 상대적으로 단면 지름의 크기가 작으므로 형상비가 커지게 되어 휨파괴가 일어나기 쉬우며, 소성힌지 구간의 높이가 낮아지기 때문에 하단의 철근 상세에 따른 영향도 달라지게 되어 단주와는 다른 내진 성능을 보인다. 이 연구에서는 축소모델 실험을 통하여 주철근 겹침이음과 횡철근상세에 따른 다주교각의 거동특성과 내진성능을 분석해본다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

** 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

*** 서울대학교 토목공학과 박사과정

**** 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, 정회원

2. 다주교각의 특성

다주교각은 재하 방향별로 다른 거동 특성을 보인다. 다주교각은 교축방향 재하시에는 단주와 같이 여러 개의 기둥이 동시에 캔틸레버식으로 거동을 하게 된다. 그러나 동일한 단면을 갖는 단주와는 다른 파괴 포락선을 가지는데, 단주교각에 비하여 기둥하나의 단면의 크기가 작기 때문에 기둥이 가늘어서 파괴시의 변위는 크지만 횡방향 최대내하력이 작아서 내진성능이 감소된다. 단면 크기의 감소는 철근 상세에도 영향을 미치는데, 소성힌지 영역이 작아져서 충분한 겹침이음 길이를 확보하기 쉽고 동일한 횡철근 간격으로 더 큰 횡구속력을 얻을 수 있으므로 철근 상세에 대한 이점을 가질 수 있다. 그러므로 교축방향의 내진 성능에 있어서는 다주와 단주의 우위를 결정하기가 쉽지 않다.

교축직각방향으로는 프레임 거동을 하므로 최대내하력이 크며 여러 곳에서 소성힌지가 발생하여 연성도 우수할 것으로 예상되므로 단주보다 더 나은 내진성능을 가질 수 있을 것으로 생각된다. 그림 1은 이 연구에서 시험체로 선정한 다주교각의 교축방향 및 교축직각방향의 단조하중재하시 해석결과를 나타낸 것이며 동일한 단면적을 갖는 단주교각에 대한 것을 함께 도시하였다.

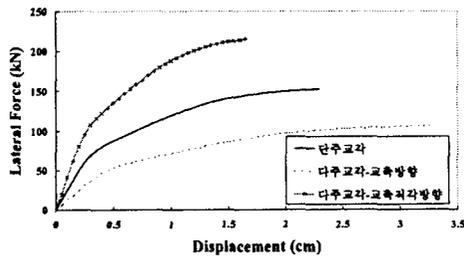


그림 1 단조하중 재하시 교각의 하중-변위 곡선

3. 실험의 개요

3.1 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. 시험체의 제원은 표 1과 같고 시험체의 형상은 그림 2와 같다.

기둥의 철근 상세는 그림 3과 같이 시험체별로 하단의 33cm(단면지름의 0.66배) 높이까지 주철근 겹침이음 여부를 달리하고, 상 하단의 소성힌지부인 75cm 높이까지 횡철근비의 변화를 두어 제작하였다. 횡철근은 콘크리트의 심부 구속효과를 높이면서도 시공성을 고려하여 135°+ 90°갈고리를 하여 두개의 반원으로 겹침이음을 하며 겹침이음부에 걸쳐도록 두 개의 보강띠철근을 두었다.

표 1 시험체의 제원

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

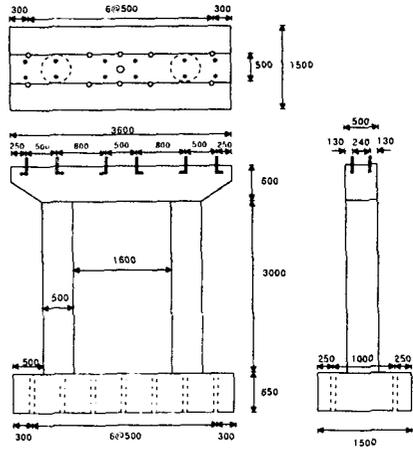


그림 2 시험체 평면도

3.2 시험체 구성

시험체는 서로 다른 철근 상세를 갖는 2세트를 제작하였다. 그중 1세트는 교각의 소성힌지영역내에 주철근의 겹침이음을 서로 번갈아 두었으며 횡철근은 현행 내진설계 규정에서 요구하는 량의 1/2을 설치하였고 다른 1세트는 주철근에 연속철근을 사용하여 겹침이음을 제거하였으며 횡철근은 주철근의 국부좌굴을 방지할 수 있는 최소량⁽²⁾을 설치하였다. 각 시험체의 구성 및 특성은 표 2와 같다.

표 2 시험체의 구성

모델명	재하방향	시험체 특성	
		주철근 겹침이음	횡철근비
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		

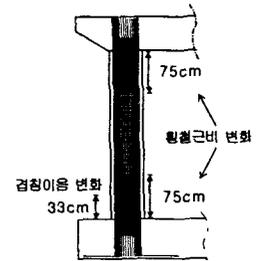


그림 3 기둥의 철근상세

3.3 하중 재하 방법

축력은 위, 아래에 2축방향 힌지를 설치한 강봉을 유압잭으로 당기는 방식으로 하였다. 수평력을 가하는 장치는 100tf 용량의 액츄에이터(Actuator)를 사용하였으며 교축방향 재하시에는 비틀림이 발생하지 않도록 2기의 액츄에이터를 설치하여 변위제어를 하였다. (그림 4)

수평력 재하는 항복변위를 구한 후 그림 5와 같이 변위에 대하여 2cycle씩 재하한다.

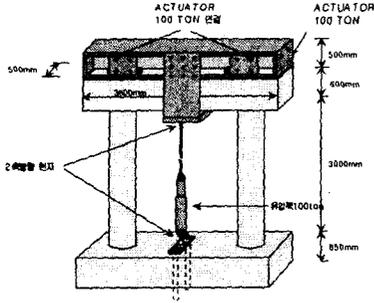


그림 4 축력재하장치 및 Actuator 위치

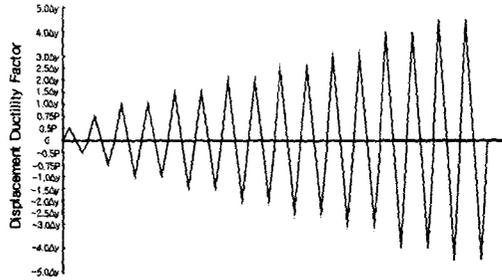


그림 5 하중재하 패턴

4. 실험 결과 및 분석

실험 결과 4기의 시험체 모두 콘크리트 피복 박리와 주철근의 좌굴을 동반한 전형적인 휨파괴가 발생하였다. 그림 6은 시험체의 하중-변위이력곡선을 나타내며 그림 7은 이들 시험체의 포락선을 재하방향별로 비교한 것이다. 시험체의 변위연성도와 파괴시의 Drift Ratio 등을 정리하면 표 3과 같다. 일반적으로 철근콘크리트 교각은 소성힌지 구간에 주철근 겹침이음이 있으면 지진과 같이 수평력이 반복적으로 작용할 때 충분한 연성을 발휘하지 못하고 부차파괴가 발생하여 조기파괴로 이어지게 된다. 이 경우 기존의 실험 결과를 볼 때 연성도는 1.5~2.0 정도로 지진에 매우 취약한 거동을 한다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 그러나, 본 실험에서는 이러한 거동특성이 나타나지 않고 연성도 4.0정도의 휨연성을 보이면서 파괴에 이르렀다. 이는 다주교각의 경우 단면의 크기가 작으므로 소성힌지영역의 높이가 낮고, 시험체를 축소 설계하면서 겹침이음길이를 주철근 지름에 비례하여 결정하였으므로 겹침이음 길이가 길어져서 부차파괴가 일어나지 않았기 때문으로 생각된다. 그리고 시험체의 횡철근 비가 기존 설계된 다른 교각들에 비하여 비교적 크고 내진설계기준에 따른 횡철근 갈고리를 사용하여 콘크리트 심부구속력이 크게 작용한 것도 한 원인이다.

철근 상세에 따른 차이는 교축방향 시험체의 경우 50% 겹침이음이 되어있는 시험체 RH-SL-L이 철근비가 크므로 소성힌지부의 휨이 적게 일어나서 연성이 다소 작으며, 교축직각방향 시험체의 경우는 상단 소성힌지부에서의 휨저항이 파괴시점에 영향을 미치므로 횡철근비가 큰 RH-SL-T가 에너지 흡수가 크게 평가되었다. 또한 교축직각방향시험체의 경우 하단의 파괴 후에도 상단의 휨저항력이 남아있으므로 이력곡선이 급격히 떨어지지 않고 완만하게 유지되어 교축방향시험체에 비해 연성이 우수하였다.

그림 9는 RH-SC 시험체의 역량스펙트럼에 의한 내진성능을 나타낸다. 교축방향재하시에는 4경간 연속교일 경우 내진 성능을 만족하지만 경간 수가 그 이상이 되면 상부구조의 관성력 때문에 내진성능을 만족하지 못한다. 즉 경간수가 많을 경우는 횡방향 내하력이 중요하므로 우수한 연성을 보유하더라도 내진성능을 만족시키기는 어렵고, 단주로 설계되어 내하력을 향상시키는 것이 유리하다고 볼 수 있다. 그러나 경간수가 작으면 다주로 설계하면서 충분한 연성을 확보할 수 있게 하는 것도 바람직하다. 교축직각방향으로는 최대 내하력도 크고 교각에 단경간에 해당하는 관성력만 작용하므로 충분한 내진성능을 발휘할 수 있으며 이는 단주로 설계시에도 만족시킬 것이라 예상된다.

표 3 각 시험체의 실험결과 정리

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

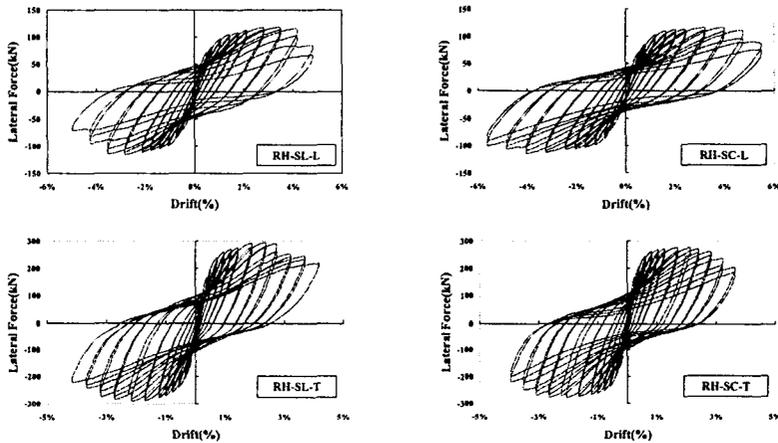
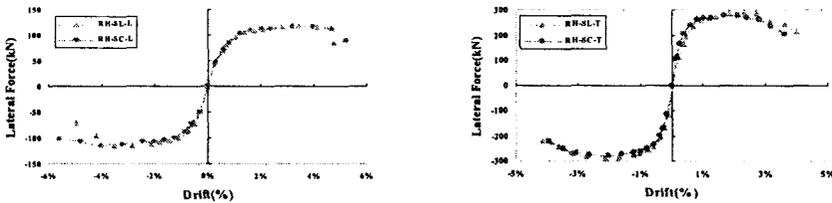


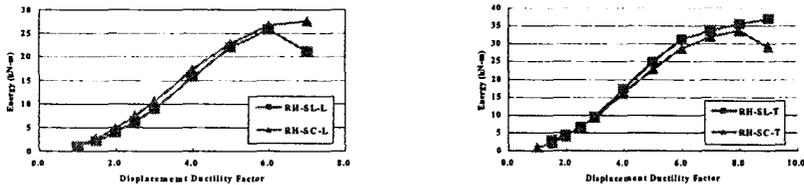
그림 6 시험체별 하중-변위 이력곡선



(a) 교축방향재하 시험체

(b) 교축직각방향 시험체

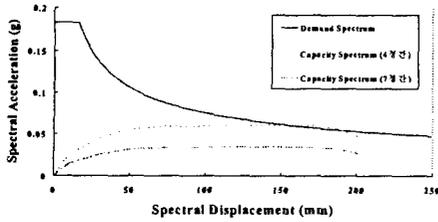
그림 7 시험체별 하중-변위 포락곡선



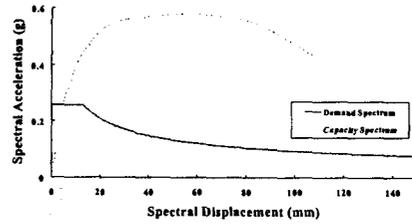
(a) 교축방향재하 시험체

(b) 교축직각방향재하 시험체

그림 8 각 시험체의 에너지 흡수량



RH-SC-L 의 역량스펙트럼



RH-SC-T 의 역량스펙트럼

그림 9 RH-SC 시험체의 역량스펙트럼

5. 결론

이 연구에서는 철근 상세를 달리하는 2세트의 2축 다주교각 시험체에 대하여 내진성능을 평가해 보았다. 주철근 겹침이음부에서의 파괴가 일어나지 않았기 때문에 전반적으로 연성도는 매우 우수하게 나타났다. 즉 다주교각은 소성힌지 영역이 작으므로 기둥의 하단에서 겹침이음을 허용하더라도 적절한 겹침이음길이와 횡철근량을 보유한다면 소요연성도를 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 교축방향으로 하중이 재하되는 경우 다경간 연속교의 경우는 큰 관성력을 받기 때문에 내진성능을 만족하기 위해서는 상당한 연성도가 요구되며 동일한 단면적을 갖는 단주교각보다 횡방향 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.

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.