

## 원장방형 철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구

# An Experimental Study on Seismic Performance of RC Bridge Columns with Oblong Section

이재훈*	고성현**	서진원***	이지영****	한상엽*****
Lee, Jae Hoon	Ko, Seong Hyun	Suh, Jin Won	Rhee, Ji Young	Han, Sang Yeup

### ABSTRACT

The objectives of this study were to provide experimental data on the behavior of interlocking spiral columns under cyclic loading, to compare the performance of columns with interlocking spirals to columns with U-type hoops with hook, to study the flexural detailing of interlocking spirals and other transverse steel configurations as the transverse reinforcement. The oblong columns with interlocking spirals and with hooked U-type hoops and cross-ties better seismic performance than the rectangular columns with rectangular hoops and cross-ties. The oblong columns with hooked U-type hoops and cross-ties showed better seismic performance than the rectangular columns with rectangular hoops and cross-ties. And this research were to make recommendations for the design of bridge columns incorporating interlocking spirals and U-type hoops with hook as the transverse reinforcement.

### 1. 서론

교량 구조물의 경우, 교각의 붕괴는 교량 전체의 붕괴로 이어질 우려가 있으므로 지진하중 작용 시 충분한 소성변형 능력을 발휘할 수 있는 연성과괴를 유발하도록 설계되어야 한다. 철근콘크리트 교각의 연성거동은 교각의 소성힌지 구간에 적절한 횡방향철근을 배근함으로써 확보할 수 있으며, 이러한 횡방향철근은 전단력에 대한 저항, 심부콘크리트의 구속효과 및 축방향철근의 좌굴 등을 방지하기 위한 목적으로 사용된다. 횡방향철근의 경우 원형단면 교각에는 나선철근을, 사각형단면 교각의 경우에는 후프띠철근과 보강띠철근의 조합으로 횡방향철근을 사용하는 것이 일반

* 정희원, 영남대학교 토목공학과 부교수	**** 한국도로공사 연구원
** 영남대학교 토목공학과 박사과정	***** 영남대학교 토목공학과 석사과정
*** 한국도로공사 책임연구원	

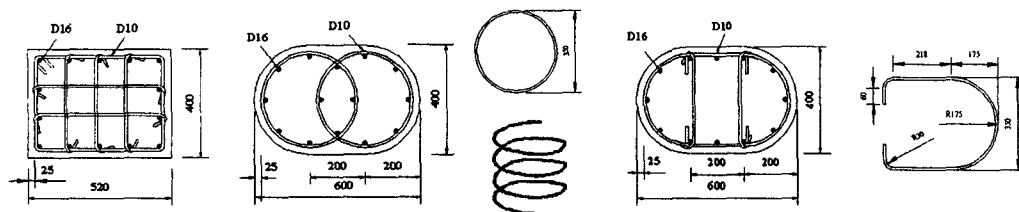
적이다. 원형단면 교각의 경우, 내진성능이 우수한 장점은 있으나 교각의 전체적인 미관 및 조화를 고려한다면 내진성능을 만족하는 한계 내에서는 교축방향의 단면크기를 줄인 직사각형 또는 원장방형 단면의 교각도 바람직할 것으로 판단된다. 원장방형 단면은 나선철근 2개 이상을 결합하여 Inter-locking 형태로 사용할 수 있으므로, 나선철근에 의한 심부구속효과로서 내진성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 나선철근의 결합(Inter-locking)은 철근배근의 시공성 문제가 대두될 수 있으므로 나선철근을 대신하여 다른 방법을 고려해 볼 수 있다. 내진성능을 확보할 수만 있다면, 심부구속철근에 따른 시공성 개선을 위하여 심부구속철근을 결합(Inter-locking)하지 않고 후프띠철근과 보강띠철근을 사용할 수도 있다. CALTRANS<sup>[4]</sup>, EC 8-part 2<sup>[3]</sup> 및 AASHTO<sup>[5]</sup>에서는 나선철근의 효율적인 심부구속효과를 원장방형 단면 교각에 적용하기 위해 횡방향철근 상세의 대안으로 결합나선철근(interlocking spiral)의 사용을 권유하고 있으며 Tanaka & Park<sup>[6]</sup>, David & Buckingham<sup>[7]</sup> 등은 결합나선철근 상세에 관한 연구결과를 보고한 바 있다.

본 연구는 원장방형 단면 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구자료의 제공을 주요 목적으로 수행된 연구로서, 횡방향철근 상세(사각형띠철근, 결합나선철근, 보강U형띠철근)에 따른 교각의 내진성능을 비교 분석하여 원장방형 단면 교각에 대한 적절한 횡방향철근 상세의 제시 및 횡방향철근으로 결합나선철근 및 보강U형띠철근을 사용하는 교각에 대한 내진설계시의 참고자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험체 제작 및 재하실험

### 2.1 실험체 단면 및 철근상세

직사각형 단면과 원장방형 단면 교각의 내진성능 평가를 위하여 단면형상, 횡방향철근 상세 및 축방향철근 상세 등을 주요변수로 총 3가지 그룹의 실험체를 제작하였다. RT 실험체는 횡방향철근 상세로서 후프띠철근과 보강띠철근의 조합으로 구성된 사각형단면 실험체를(그림 1(a)), IS 실험체는 횡방향철근 상세로서 결합나선철근을 사용한 원장방형 단면 실험체를(그림 1(b)), HC 실험체는 보강U형띠철근을 사용한 원장방형 단면 실험체를(그림 1(c))를 나타낸 것이고, 실험체의 주요변수, 단면치수 및 철근상세를 표 1과 그림 1에 나타내었다. HC 실험체는 U형 후프띠철근과 단변방향으로의 보강띠철근이 배근된 것으로서 U형 후프띠철근에 90° 갈고리가 있다.



(a) RT 단면형상 (b) IS 단면형상 및 나선철근 (c) HC 단면형상 및 U형후프띠철근

그림 1. 심부구속철근에 대한 주요 사항

직사각형 단면과 원장방형 단면의 형상을 가진 기둥 실험체를 제작하였다. 두 가지 형태의 단면이 동일한 단면적이 되도록 단면의 크기를 결정하여, 직사각형 단면은 52cm×40cm, 원장방형 단

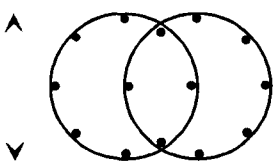
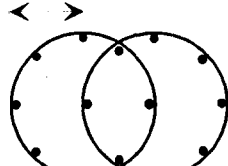
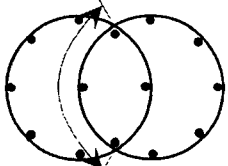
면은 60cm×40cm로 제작하였다. Group II의 IS 단면은 나선철근망의 중심간 간격은 20cm로 단일 나선철근망에 의해 심부구속된 지름의 0.57배이고, 결합상세를 표 2에 나타내었다. 축방향철근은 D16, 횡방향철근은 D10을 사용하였으며 횡방향철근은 8cm의 수직 간격으로 배근하였고, 기둥 부재의 총 길이는 140cm이다.

표 1 약축 실험체의 실험변수(aspect ratio : 3.5)

종류	실험체명	심부구속철근 형태	축방향철근비	심부구속철근비	축력비
Group I	R-RT-07	Type I (RT)	1.34 %	2.49 %	0.07
	R-RT-11				0.11
	R-RT-15				0.15
Group II	O-IS-07	Type II (IS)	1.35 %	1.21 %	0.07
	O-IS-11				0.11
	O-IS-15				0.15
Group III	O-HC-07	Type III (HC)	1.16 %	1.38 % <sup>(주 1)</sup>	0.07
	O-HC-11				0.11
	O-HC-15				0.15

(주 1) U형 후프철근의 갈고리 길이를 무시한 횡방향철근 체적비

표 2 Group II (IS 단면) 나선철근의 결합상세

심부 지름 (철근 외측표면 사이의 거리)	심부구속부 반지름 (철근 중심간 거리)	결합부의 호 길이
 350 mm	 170 mm	 321 mm

## 2.2 재하실험

내진성능실험 방법으로 준정적실험(Quasi-static test)을 실시하였다. 재하실험시 횡하중을 단면의 약축방향(교축방향)으로 가력하였고, 축방향하중은 100tonf 오일잭을 이용하여 일정하게 유지하면서 1000tonf MTS hydraulic actuator로 그림 2와 같은 형태의 변위제어방식으로 횡방향 하중을

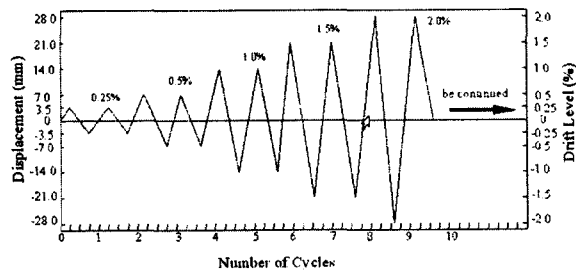


그림 2 실험전경 및 횡방향 하중 재하형태

재하 하였다.

### 3. 약축방향 실험결과 및 분석

#### 3.1 파괴양상

피복콘크리트의 스포링 이전까지의 전반적인 거동양상은 모든 실험체가 유사한 거동을 나타내었다. 피복콘크리트의 스포링이 진전되면서 압축축 축방향철근의 좌굴현상이 관찰되었다. 축방향 철근 좌굴 이후의 실험체의 파괴양상은 횡방향철근 상세에 따른 영향으로 실험체마다 조금 다른 파괴양상을 나타내었으나 횡방향철근의 파단은 발생하지 않았고, 최종적으로 축방향철근의 파단에 의해 실험체는 파괴되었으며, 낮은 축력비(0.07, 0.11)의 경우 모든 실험체에서 동일한 양상을 나타내었다. 축력비 0.15의 경우 RT 실험체는 drift level 7.0 %에서 축방향철근이 파단되었으나, 그 외의 실험체들은 drift level 8.0 %에서 축방향철근이 파단되었다. 동일한 축력비에 대하여 파괴형상을 비교하면, 기준실험체인 RT 실험체는 심부콘크리트까지 파괴되는 양상을 보였으나, IS와 HC 실험체는 피복콘크리트만 파괴되었으며 그림 3에 나타내었다.

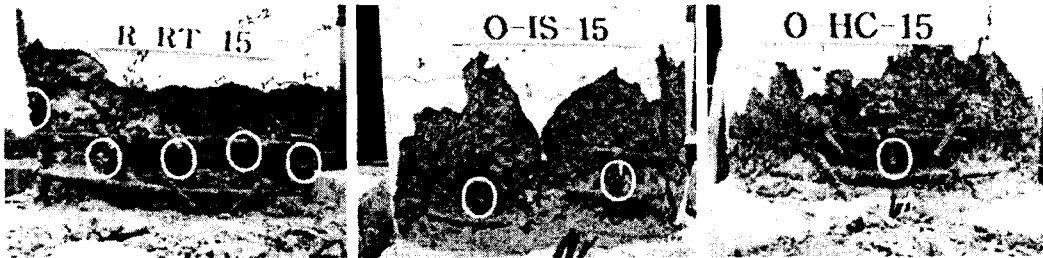


그림 3 축력비 0.15에 대한 실험체의 파괴형상

#### 3.2 횡하중-변위 관계

실험결과로부터 측정된 횡하중-변위 관계를 그림 4에 나타내었다. 항복변위 이전까지의 횡하중-변위 관계는 강도나 강성의 저하 없이 안정적인 거동을 나타내었다. 항복변위 이후, 강도 및 강성의 저하가 나타나기 시작하였으나, 축방향철근의 파단으로 인한 파괴 전까지 휨강도를 유지하면서 충분한 연성거동을 나타내었다.

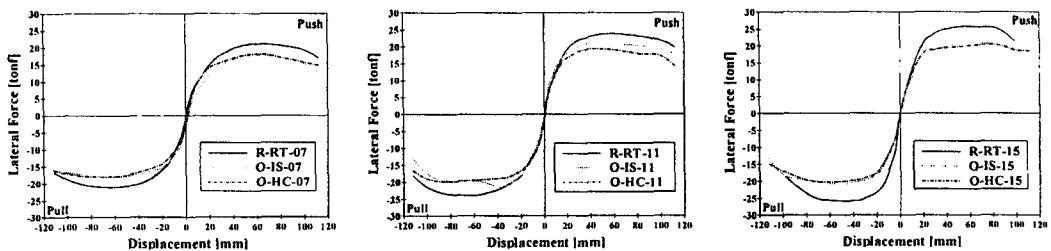


그림 4 하중-변위 포락곡선

각 단면별 하중-변위 이력곡선은 단면형태와 축방향철근 배치형태의 차이로 인한 횡하중의 차이가 다소 발생하였다. 결합나선철근 실험체가 사각형 단면 실험체에 비하여 횡방향철근량이 약 49% 정도만 배근됨에도 불구하고 우수한 내진성능을 보이는 것으로 나타났다. 보강U형띠철근 실험체는 사각형 실험체과 비교하여 14.1%의 축방향철근량, 44.6%의 횡방향철근량이 작게 배근되었으나, 전반적인 거동 및 연성능력은 나선철근 실험체와 유사한 경향을 나타내었다.

### 3.3 최소 극한 drift 비율 및 변위연성도

실험체의 극한상태를 정의하기 위한 최소극한변위의 정의는 동일한 drift 변위에서 2회(cycle)의 반복하중이 가력되어도 횡하중강도의 감소가 20% 이하이거나 횡방향철근 및 축방향철근이 파단되지 않는 변위를 최소극한변위로 정의하였다. 실험결과에 의한 실험체의 최소 극한 drift 비율은 축력이 낮은 경우(축력비 0.07), 모든 시험체에서 약 7%의 극한 drift 비율을 나타내었다. 축력이 높은 경우(축력비 0.15)에는 RT 시험체를 제외한 대부분의 실험체에서 약 7%의 극한 drift 비율을 나타내었다. 또한, 모든 실험체에서 최소한 3.47 이상의 응답수정계수를 나타내었다.

표 3 변위연성도 및 응답수정계수

시험체명	항복변위 [mm]	극한변위 [mm]	극한 drift [%]	응답수정계수 R	
				$= \mu_{\Delta}$	$= \sqrt{2\mu_{\Delta}-1}$
R-RT-07	12.14	98.2	7	8.09	3.90
O-IS-07	12.15	98.3	7	8.09	3.90
O-HC-07	12.26	98.2	7	8.01	3.88
R-RT-11	12.39	98.4	7	7.94	3.86
O-IS-11	12.27	98.1	7	8.00	3.87
O-HC-11	12.36	98.2	7	7.95	3.86
R-RT-15	12.92	84.3	6	6.53	3.47
O-IS-15	12.92	98.5	7	7.63	3.78
O-HC-15	12.95	98.3	7	7.59	3.77

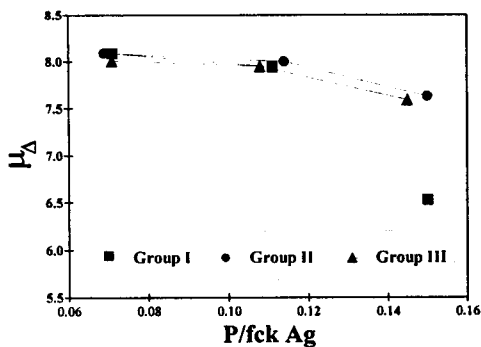


그림 5 변위연성도

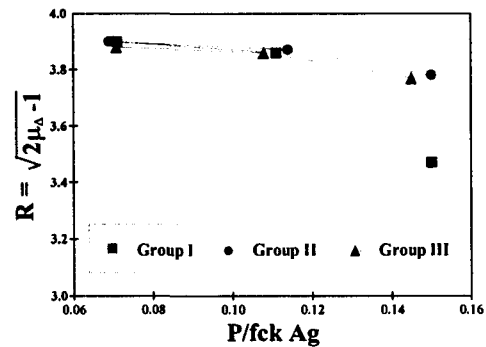


그림 6 응답수정계수

### 3.4 등가점성감쇠비

교량에서 가장 일반적인 형태의 감쇠와 에너지 소산은 하중-변위 곡선의 이력감쇠로 나타낼 수 있다. 그림 7은 실험결과에 의한 각 실험체의 등가점성감쇠비를 나타낸 것으로서, 실험체의 등가점성감쇠비는 부재의 항복시 약 5% 정도를 나타내며 부재의 파괴시까지 거의 선형으로 증가하여 약 23% 이상의 비율을 나타내었다.

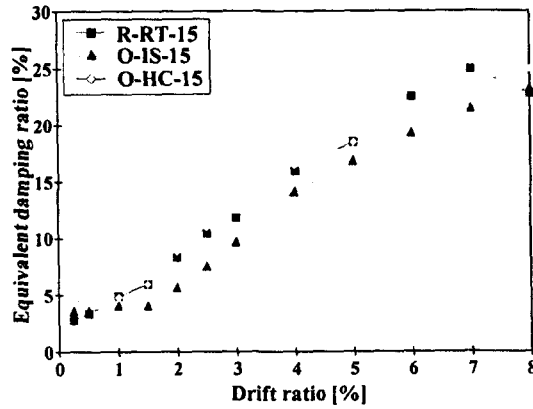


그림 7 등가이력감쇠비(축력비 0.15)

### 4 횡방향철근량의 비교

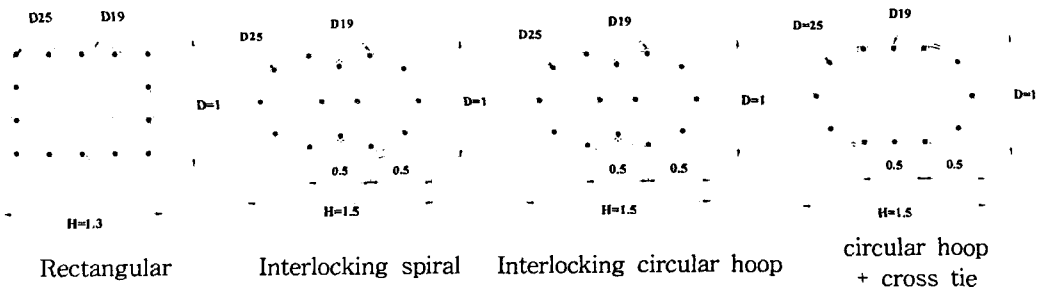
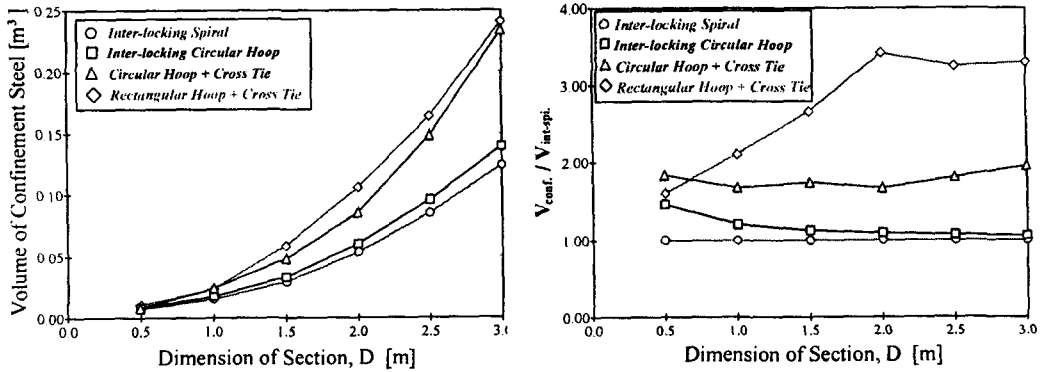


그림 8 소성현저 구간 1m당 횡방향철근량의 비교

그림 8은 소성힌지구간 1m당 횡방향철근량을 비교하여 나타낸 것으로서, 단면의 치수가 증가할수록 횡방향철근량은 증가하는 경향을 나타낸다. 그림 8에서 나타내고 있듯이 동일한 단면치수인 경우 결합나선철근의 횡방향철근량은 다른 단면과 비교할 경우 가장 작은 값을 나타내며, 사각형 단면의 경우 가장 많은 횡방향철근량을 나타내고 있다.

철근콘크리트 교각의 내진설계시에 심부구속철근의 상세를 선정할 때에는 심부구속철근의 상세에 따른 내진성능과 더불어 경제성과 시공성을 동시에 고려해야 할 것이다. 표 4는 횡방향 철근 상세별 장단점을 상대적으로 표현한 것이다. 표 4에서 연성능력, 에너지 소산능력, 파괴형상 등은 실험결과에 의한 것이며, 시공성은 횡방향철근 가공 및 배근을 기준으로 한 것이고, 경제성은 소성힌지 구간 1 m에 대한 횡방향철근량에 대한 분석자료에 따른 것이다.

시공성에 있어서 RT(사각형 띠철근) 기둥은 양방향으로 배근되는 보강띠철근의 배근이 간편하지 않다는 점이 고려되었으며, IS(결합 나선철근) 기둥은 나선철근망의 결합이 간편하지 않다는 점이 고려되었다. HC(유갈고리 U형 띠철근) 기둥은 후프띠철근의 직선으로 겹친부분을 감싸도록 약축방향으로만 보강띠철근이 필요하므로 양방향으로 보강띠철근이 배근되어야 하는 RT(사각형 띠철근) 기둥보다는 상대적으로 배근이 어렵지 않다는 점이 고려되었다. 그러나, 설계시 단면의 횡방향철근 상세는 내진성능, 시공성 및 경제성을 고려하여 결정하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단된다.

표 4 횡방향 철근 상세별 장단점 비교

구 분		RT	IS	IC	HC
내진성능 및 거동	연성능력	△	○	○	○
	에너지 소산 능력	○	○	○	○
	파괴형태	△	○	○	△
시공성 (횡방향철근)		△	△	○	○
경제성 (횡방향철근)		×	○	○	△

주) ○ : 매우 좋거나 바람직함    △ : 다소 부적절    × : 부적절

## 6. 결론

- (1) 형상비(aspect ratio)가 3.5인 모든 약축 실험체에서 파괴시 횡방향철근의 파단은 발생하지 않았으며, drift level 7~8%에서 축방향철근이 파단되어 횡하중강도를 상실하는 휨파괴의 양상을 나타내었다.
- (2) 사각형 후프띠철근 실험체(RT)는 심부콘크리트까지 파괴되는 양상을 보였으나, 결합나선철근 실험체(IS), 보강U형띠철근 실험체(HC)는 피복콘크리트만 파괴되었다. 따라서 파괴양상을 기준으로 할 때 결합나선철근과 보강U형띠철근의 철근상세가 뛰어난 심부구속성능을 보유한 것으로 판단된다.
- (3) 축력비 0.07와 0.11에서는 모든 실험체가 약 8.0 이상의 변위연성도를 보이며, 축력비 0.15의 경우는 기준실험체(RT)가 6.53의 변위연성도를 보이지만, IS, HC 실험체는 약 7.6의 변위연성

- 도를 나타내었다. 동일에너지원리(equal energy principle)를 적용한 응답수정계수의 산정결과, 모든 실험체는 3.0을 상회하였다.
- (5) 모든 실험체가 안정적인 에너지 소산능력을 발휘하였으며 각 단면형상별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 축방향철근의 항복시 등가감쇠비는 5% 내외였고 극한상태에서 약 23~26%를 나타내었다.
- (5) 파괴양상 및 변위연성도를 기준으로 할 때 결합나선철근과 보강U형띠철근의 철근상세가 뛰어난 내진성능을 보유한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
2. Caltrans, *Bridge Design Specifications*, California Department of Transportation, Sacramento, July, 2000.
3. CEN, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*, Eurocode 8 Part 2, European Committee for Standardization, 1996
4. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 16-th edition, Washington, D.C., USA. 1995.
5. H. Tanaka and R. Park, "Seismic Design and Behavior of Reinforced Concrete Columns with Interlocking Spirals", ACI Structural Journal, Vol. 90, No. 2, 1993, pp. 192-203
6. David I. McLen, Grant C. Buckingham, "Seismic Performance of Bridge Columns with Interlocking Spiral Reinforcement", 1994