

결합나선철근 및 결합원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Seismic Performance of RC Bridge Columns with Interlocking spirals and Interlocking circular hoops

고성현^{*} 이재훈^{**} 서진원^{***} 이지영^{****} 손혁수^{*****} 최진호^{*}
Ko, Seong Hyun Lee, Jae Hoon Suh, Jin Won Rhee, Ji Young Son, Hyeok Soo Choi, Jin Ho

ABSTRACT

The experimental study for oblong section was carried out by the column test in weak axis. The column specimens had 3 types of transverse steel configurations, such as interlocking spirals, interlocking circular hoop ties and rectangular ties. The oblong columns with interlocking spirals and with interlocking circular hoop ties showed better seismic performance than the rectangular columns with rectangular hoops and cross-ties. 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 various transverse steel configurations, to study the flexural detailing of interlocking spirals, interlocking circular hoops, and other transverse steel configurations as the transverse reinforcement, and to make recommendations for the design of bridge columns incorporating interlocking spirals, circular hoops as the transverse reinforcement.

1. 서론

교각의 내진성능에는 여러 가지 변수가 영향을 미치는데, 주요 변수 중의 하나가 교각의 단면형상이다. 교각의 소성변형능력 관점의 내진성능만을 고려한다면, 일반적으로 원형단면의 교각이 횡방향철근에 의한 심부구속효과가 좋으므로 가장 바람직한 단면형태일 수 있으나, 교량받침의 배열, 교각의 구조형식, 시공성 등 여러 가지 조건을 고려하여 직사각형 단면형태를 사용하기도 한다. 일반적으로 직

* 정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 한국도로공사 책임연구원

**** 정회원, 한국도로공사 연구원

***** 정회원, 영남대학교 토목공학과 박사후 연구원

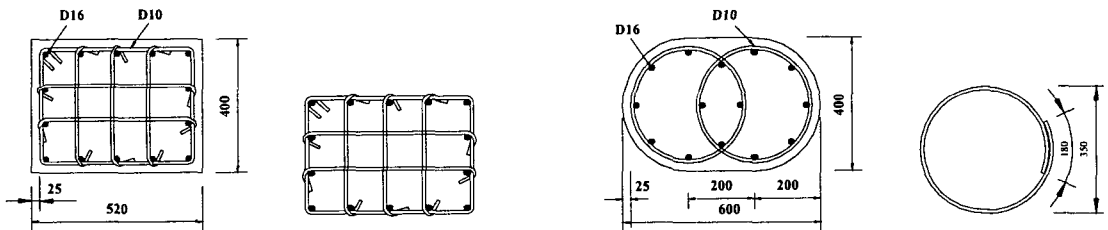
사각형단면에 대한 심부구속철근은 직사각형의 후프띠철근과 보강띠철근으로 이루어지므로 원형의 나선철근기둥에 비하여 심부구속철근의 요구량이 많다. 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 단면의 형태로 사각형과 반원이 조합된 원장방형(Oblong) 단면을 고려해 볼 수 있다. 원장방형 단면은 나선철근 2개 이상을 겹친 Inter-locking 형태를 사용할 수 있음으로서 내진성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다. Tanaka & Park^[6], David & Buckingham^[7], Yoshiharu^[8] 등은 나선철근 2개 이상을 겹친 Inter-locking 형태를 사용한 원장방형 단면 실험체는 사각형단면 실험체보다 내진성능이 우수하다고 보고하였다. 또한, 기둥의 소성힌지 구간의 심부콘크리트를 구속하기 위해 요구되는 횡방향철근량을 줄일 수 있을것이라고 보고한 바 있다. 그리고, EC 8-part 2^[3], CALTRANS^[4] 및 AASHTO^[5] 등에서 원장방형(Oblong) 기둥에 대한 기준이 제시되어 있다. EC 8-part 2와 CALTRANS는 결합되는 나선철근망들의 중심간 간격을 각각 나선철근망 지름의 0.75배와 0.6배를 초과할 수 없도록 규정하고 있다. 이와 같이 외국의 경우 결합나선철근 교각의 장점으로 인해 널리 사용되고 있으나, 국내의 경우 결합 나선철근 교각의 성능 및 설계를 위한 기준은 아직까지 완전히 정립되지 못한 실정이며 원장방형 단면 교각에 관한 연구가 전무한 실정이다.

또한, 나선철근의 결합(Inter-locking)은 철근 배근의 어려움으로 인한 시공성의 문제가 대두될 수 있으므로 본 연구에서는 나선철근을 대신하여 원형 띠철근을 결합(Inter-locking)하는 방법도 고려하였다. 결합나선철근 및 결합원형 띠철근의 횡방향철근 상세에 관한 연구를 수행함으로써, 향후 국내 교량의 내진설계 지침에 관한 참고자료를 제공하고자 한다.

2. 실험체 제작 및 재하실험

2.1 실험체 단면 및 철근상세

직사각형 단면과 원장방형 단면 교각의 내진성능 평가를 위하여 두 가지 형태의 단면을 가진 기둥 실험체를 제작하였다. 두 가지 형태의 단면이 동일한 단면적이 되도록 단면의 크기를 결정하여, 직사각형 단면은 52cm×40cm, 원장방형 단면은 60cm×40cm로 제작하였다. 축방향철근은 D16, 횡방향철근은 D10을 사용하였으며 횡방향철근은 8cm의 수직 간격으로 배근하였고, 부재의 총 길이는 140cm이다.



(a) Group I의 단면형상 및 심부구속철근

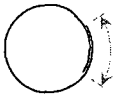
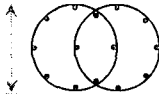
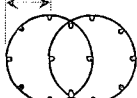
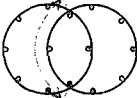
(b) Group II의 단면형상 및 결합원형띠철근의 겹침이음

그림 1 Group I 및 Group II (IS 단면과 IC 단면)의 심부구속철근에 대한 주요 사항

Group II의 IS와 IC 단면에서 나선철근망 및 원형띠철근망의 중심간 간격은 20cm로 단일 원형띠철근망에 의해 심부구속된 지름의 0.57배이다. IC 단면의 원형띠철근은 기계적 이음을 하지 않고, 겹침이

음길이 18cm로 겹침이음하여 제작하였다. 인장을 받는 이형철근의 정착길이에 관한 규정에 따르면 도로교표준시방서(1996)^[1] 3.5.2의 식(1)에 의해서는 17.2cm, 도로교설계기준(2000)^[2] 4.3.11.2의 식(2)에 의해서는 28.1cm, 4.3.11.4의 식(3)에 의해서는 16.8cm로 산정되나, 축소교각모형실험임을 감안하여 겹침이음길이를 결정하였다. 두 개의 원형띠철근망이 결합되는 부분에 겹침이음부가 위치되도록 배근하였으며 원형띠철근의 겹침이음길이를 심부지름, 심부구속부 반지름, 결합부분의 길이 등과 비교하여 표 1에 나타내었다.

표 1 Group II (IS 단면과 IC 단면) 심부구속철근에 대한 주요 사항

원형띠철근의 겹침이음길이	심부 지름 (철근 외측표면 사이의 거리)	심부구속부 반지름 (철근 중심간 거리)	결합부의 호 길이	횡방향철근 공칭지름
				D10
$l_0 = 18.0 \text{ cm}$	$l_1 = 35.0 \text{ cm}$	$l_2 = 17.0 \text{ cm}$	$l_3 = 32.1 \text{ cm}$	$l_4 = 0.953 \text{ cm}$
$l_0/l_0 = 1$	$l_0/l_1 = 0.51$	$l_0/l_2 = 1.06$	$l_0/l_3 = 0.56$	$l_0/l_4 = 18.9$

$$l_{db} = \frac{0.06 A_b \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{ck}}} \quad , \quad 0.006 d_b \sigma_y \text{ 중 큰 값} \quad (1)$$

$$l_{db} = \frac{0.152 d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (2)$$

$$l_{db} = 0.285 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{c + K_{cr}} \frac{1}{d_b} \quad (3)$$

사각형 단면과 원장방향 단면 기둥에 대하여 유사한 단면강도를 얻기 위하여 축방향철근은 각각 14 개씩 배근하였고, 축력비는 0.07, 0.11, 0.15로 설정하여 실험시 재하하였다. 결합심부에 배근되는 축방향 철근의 역할을 파악하기 위해 O-IC-11-A 실험체는 결합부에 8개의 축방향철근이 배근되었다.

표 2 약축 실험체의 실험변수(aspect ratio : 3.5)

종 류	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-1 (IS)	1.35 %	1.21 %	0.07
	O-IS-11				0.11
	O-IS-15				0.15
	O-IC-07	Type II-2 (IC)	1.72 %	1.21 % ^(주 1)	0.07
	O-IC-11				0.11
	O-IC-15				0.15
	O-IC-11-A				0.11

(주 1) 원형띠철근의 겹침이음부 길이를 무시한 경우의 횡방향철근 체적비

2.2 재하실험

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

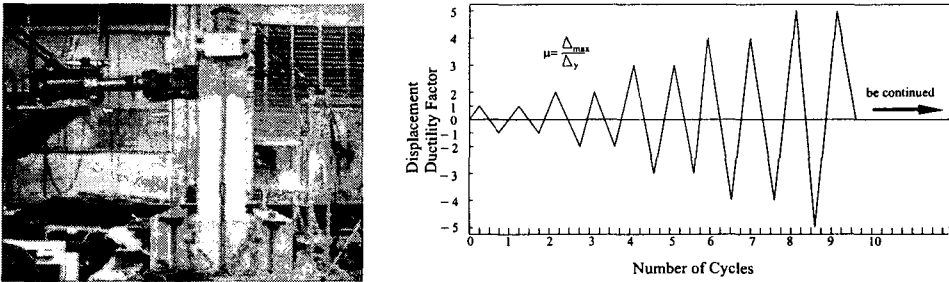


그림 2 실험전경 및 횡방향 하중 재하형태

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴양상

모든 실험체에서 횡방향철근의 파단은 관찰되지 않았고 축방향철근이 파단된 후에 횡하중이 급격히 감소되어 실험을 종료하였다. 약축에 대한 실험체의 전반적인 균열 및 파괴양상을 요약하면 다음과 같다. 초기 균열은 drift level 0.25~0.5%일 때 발생하였고, 휨균열이 진전되었으며 수직균열의 발생 및 진전과 더불어 콘크리트 피복의 박리가 진행되었다. 그 후 변위 증가에 따라 축방향철근의 좌굴 및 콘크리트 피복의 박리, 축방향철근의 파단으로 부재의 강성이 저하되어 최대횡력 이후에 급격히 지지력이 감소되었다. 낮은 축력비(0.07, 0.11)의 경우 사각형 및 원장방형 실험체의 파괴양상이 유사하였으나 0.15의 축력비에서는 차이를 보였다. 0.15축력비의 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, IS, IC 실험체는 피복콘크리트만 파괴되었다.

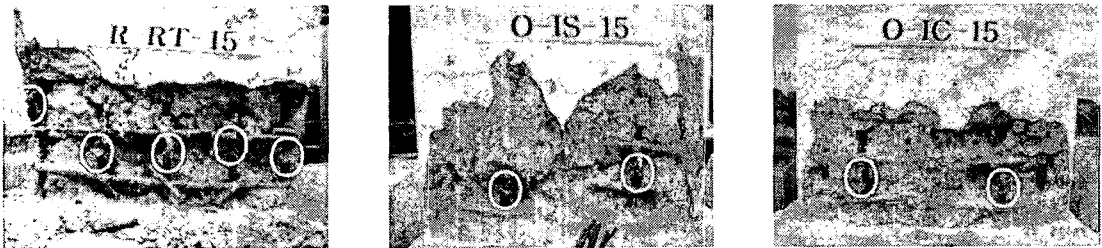


그림 3 축력비 0.15에 대한 실험체의 파괴형상

3.2 하중-변위 포락곡선

축력비 0.07 및 0.11의 경우 각 단면별 하중-변위 이력곡선은 단면형태와 축방향철근 배치형태의 차이로 인한 횡하중의 차이가 다소 발생하지만 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 축력비 0.15의 경우에는 IS 실험체, IC 실험체가 RT 실험체에 비하여 우수한 연성능력을 나타내고 있다.

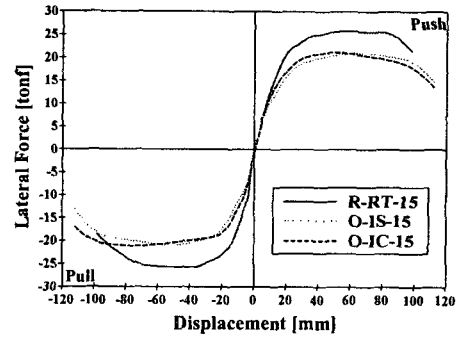


그림 4 하중-변위 포락곡선(축력비 0.15)

3.3 변위연성도

그림 5에 나타난 바와 같이 축력비가 증가하면 변위연성도와 동일에너지원리(equal energy principle)를 적용한 응답수정계수가 감소하는 경향을 보였다. 축력비 0.15의 경우는 기준실험체(RT) 실험체가 변위연성도 6.53으로 나타났고, IS, IC 실험체는 약 7.6의 변위연성도로 분석되었다. 즉, 축력비가 낮은 경우는 각 단면형상 및 철근상세에 대한 차이가 거의 없으나 축력비 0.15의 경우에는 변위연성 능력의 차이를 보였다.

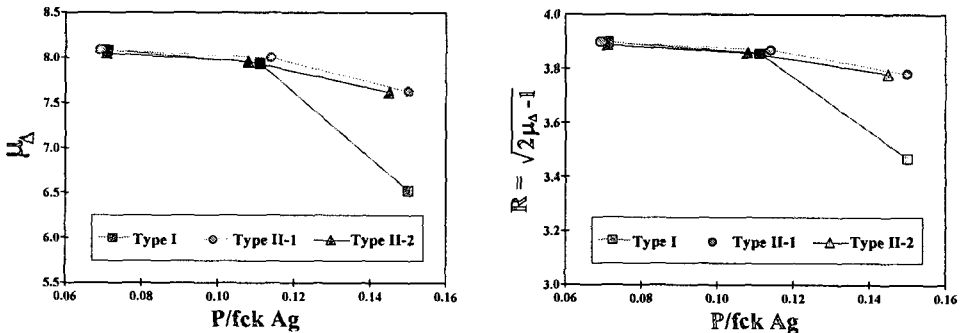


그림 5 축력비별 변위연성도 및 응답수정계수

3.4 등가점성감쇠비

축방향철근의 항복시의 등가감쇠비는 축력비에 관계없이 대략 5% 정도로 분석되었다. 축력비가 0.07인 경우 drift level 8%에서는 등가감쇠비가 22.5~26.5%로 나타났고, 축력비 0.11의 경우 극한상태에서 최대 24~26%의 등가감쇠비를 보였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 축력비 0.15인 경우에도 22.5~24.9%를 나타내고 있으므로, 현재 설계기준에서 설계시에 제시하고 있는 5% 감쇠비는 매우 안전측인 것으로 판단된다.

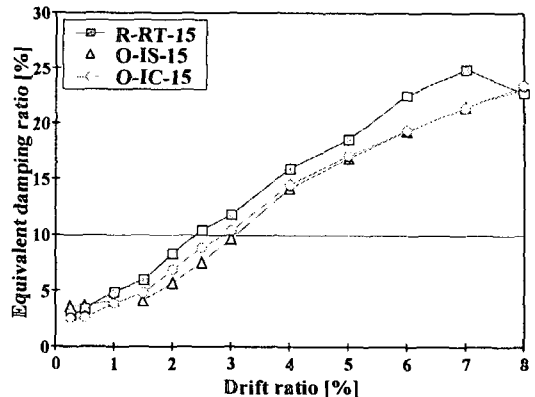


그림 6 등가이력감쇠비(축력비 0.15)

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), 결합원형띠철근 실험체(IC)는 피복콘크리트만 파괴되었다. 따라서 파괴양상을 기준으로 할 때 결합나선철근과 결합원형띠철근의 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, IC 실험체는 약 7.6의 변위연성도를 나타내었다. 동일에너지원리(equal energy principle)를 적용한 응답수정계수의 산정결과, 모든 실험체는 3.0을 상회하였다.
- (4) IC 실험체 중 횡방향철근망의 결합(Interlocking)부에 축방향철근을 4개 추가한 실험체의 경우 단면강도는 9.6% 증가하였으나 연성능력은 동일하였다. 따라서 결합횡방향철근을 사용하는 경우, 철근의 조립 및 배근과정에서 결합부 내부에 4개의 축방향철근을 배치한다면 그 이상의 축방향철근을 추가로 배근할 필요는 없을 것으로 판단된다.
- (5) 모든 실험체가 안정적인 에너지 소산능력을 발휘하였으며 각 단면형상별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 축방향철근의 항복시 증가감쇠비는 5% 내외였고 극한상태에서 약 23~26%를 나타내었다.
- (6) 원형띠철근의 겹침이음길이는 안전측으로 결합부 호 길이의 56%를 적용하는것이 적절할 것으로 보이며 결합나선철근 및 결합원형띠철근 기둥의 횡방향철근 상세는 실무 적용시 양호한 내진성능이 기대된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 대한토목학회, 도로교표준시방서, 1996.
2. 건설교통부, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
3. CEN, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*, Eurocode 8 Part 2, European Committee for Standardization, 1996
4. Caltrans, *Bridge Design Specifications*, California Department of Transportation, Sacramento, July, 2000.
5. AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1st edition*, Washington, D.C., USA. 1994.
6. 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.
7. David I. McLen, Grant C. Buckingham, "Seismic Performance of Bridge Columns with Interlocking Spiral Reinforcement", 1994
8. Yoshiharu MIZUGAMI, Yoshinori IGASE, "Cyclic Lateral Loading Tests of Bridge Column with Interlocking Spiral Reinforcement and Fabrication Test of Interlocking Spirals", *日本道路公團試験研究所報書*, Vol. 37, 2000, pp. 33-43.