

횡방향철근 상세에 따른 원형기둥의 내진성능 Seismic Performance of Circular Columns considering Transverse Steel Details

이재훈* 석상근** 윤석규*** 강상규****
Lee, Jae-Hoon Seok, Sang-Geun Yun, Suk-Gu Kang, Sang-Kyu

Abstract

This study was conducted to investigate the seismic behavior assessment of circular reinforcement concrete bridge piers, particularly with regard to assessing the displacement ductility, curvature ductility, response modification factor(R), and plastic hinge region etc. The experimental variables of bridge piers test consisted of transverse steel details, amount and spacing, different axial load levels etc. The test results indicated that reinforcement concrete bridge piers with confinement steel by the code specification exhibited sufficient ductile behavior and seismic performance. Also, it is found that current seismic design code specification of confinement steel requirements may be revised.

1. 서론

최근 1999년에 터키와 대만 및 그리스에서 발생한 몇 차례의 큰 지진에 의한 막대한 인명 및 국가적인 경제손실 등의 피해사태가 발생함에 따라 지진에 대한 구조물의 안전성 확보가 요구되어지고 있는 실정이다. 국내의 경우도 지진에 대하여 비교적 안전지대에 위치하고 있다고 인식되어져 왔으나, 앞으로 지진활동이 활성화될 확률이 증가하고 있어 지진에 대한 안전지대라고 할 수는 없는 실정이다. 근래에 발생한 약진들이 토목구조물 또는 건축구조물에 손상을 주지는 않았지만, 앞으로 중진이상의 지진이 발생할 가능성을 배제할 수는 없는 실정이다. 따라서, 국내에서도 1992년 도로교표준시방서에 내진설계편이 신설됨에 따라 교량에 대한 내진설계가 이루어지고 있다. 그러나 시방서에 내진설계편이 제정된 후 철근콘크리트 교각의 내진설계 및 내진상세에 따른 과도한 횡구속철근의 사용으로 인한 시공의 난이성으로 많은 기술자 및 현장노무자들이 현장 시공에 어려움을 겪어왔다. 이는 시방서의 각 규준이 의미하는 바를 잘못 해석하여 바람직하지 않은 설계가 이루어진 경우도 있으며, 각 규준의 숨은 의도를 명확히 파악하지 못하여 현실적으로 시공하기 매우 어려운 설계가 이루어진 경우도 많다. 특히, 철근콘크리트 교각의 소성힌지부에 배근되는 심부구속철근에 대하여 많은 실무기술자들이 설계 및 시공상의 어려움에 직면하고 있는 실정이다.

* 영남대학교 토목공학과 조교수, 정회원

** 영남대학교 토목공학과 박사과정

*** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

**** 한국도로공사 도로연구소 연구원

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 원형띠철근 기둥의 역학적 거동을 규명함으로써 원형단면에 적합한 띠철근상세를 제시하고 철근콘크리트 기둥의 내진성능 향상과 장기적으로는 심부구속철근의 시방규정개선을 위한 연구자료를 제공하고자 한다.

2. 시험체 제작 및 재하실험

2.1 시험체 제작

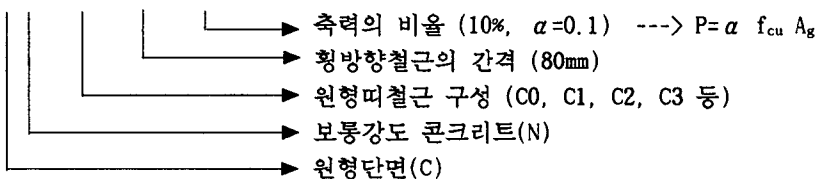
본 연구에서는 일정한 축력하에서 반복횡하중이 작용하는 보통강도 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하기 위하여 단면의 직경 40cm, 부재의 총길이 230cm인 원형단면 시험체 25개를 제작하였다.

표 2.1 시험체 상세

시험체번호	시험체명	종방향철근	심부구속철근		갈고리길이
			구 성	횡방향철근비	
1	CN-SP-60-10	8-D16 $A_s = 15.89\text{cm}^2$ $\rho_g = 1.26\%$ cover = 2cm	Spiral	0.0132	-
2	CN-SP-60-20				
3	CN-SP-60-30				
4	CN-SP-80-10				
5	CN-SP-80-20				
6	CN-SP-80-30				
7	CN-SP-100-10				
8	CN-SP-100-20				
9	CN-SP-100-30				
10	CN-C0-80-10		Type I	0.0099	$6d_b$
11	CN-C0-80-20				
12	CN-C0-80-30				
13	CN-C1-80-10				
14	CN-C1-80-20		Type II	0.0099	$6d_b$
15	CN-C1-80-30				
16	CN-C2-80-10		Type III	0.0099	$6d_b$
17	CN-C2-80-20				
18	CN-C2-80-30				
19	CN-C3-80-10		Type IV	0.0099	$6d_b$
20	CN-C3-80-20				
21	CN-C3-80-30		Type I-1	0.0099	$12d_b$
22	CN-C4-80-20				
23	CN-C5-80-20				
24	CN-C6-80-20				
25	CN-C7-80-20				

※ 시험체명의 의미

C N - C0 - 80 - 10



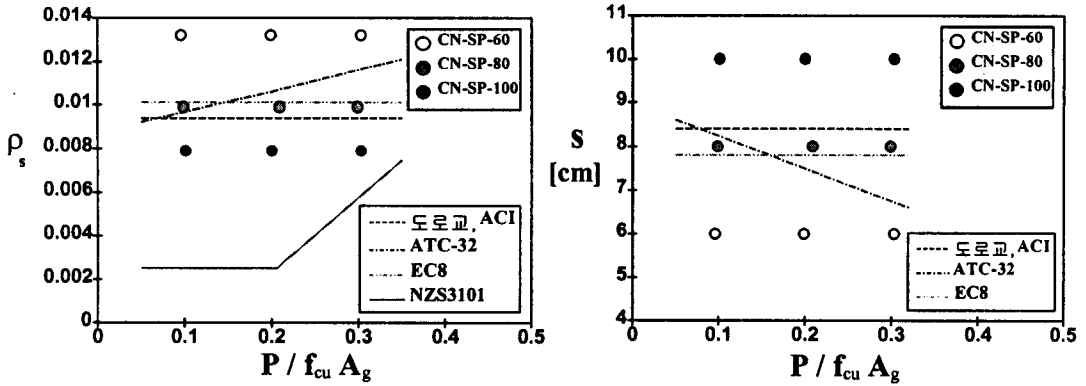


그림 2.1 원형기둥의 설계기준별 횡방향철근비 및 간격의 비교

그림 2.1에서는 여러 시방서 규정에 따른 횡방향철근비와 간격을 설계기준별로 비교하였다. CN-SP-80 시험체의 횡방향철근량은 도로교표준시방서, EC8 및 ACI 318의 심부구속 나선철근 요구량과 유사한 양으로 평가되지만, 축력비를 고려하는 ATC-32와는 축력비가 높을수록 차이가 발생하였다. NZS 3101에서는 CN-SP 시험체를 기준으로 할 때, 축력비가 0.21이하일 때는 종방향철근의 좌굴을 방지하기 위한 최소 횡방향철근량으로 배근하도록 규정하고 있다.

2.2 횡방향철근의 구성

횡방향철근은 보강띠철근의 상세에 따라 C0, C1, C2, C3의 형태를 가지고 있으며, 갈고리 연장 길이는 $6 d_b$ 이다. C4, C5, C6, C7 시험체는 갈고리 연장길이가 $12 d_b$ 인 것 외에는 C0, C1, C2, C3 시험체와 같다.

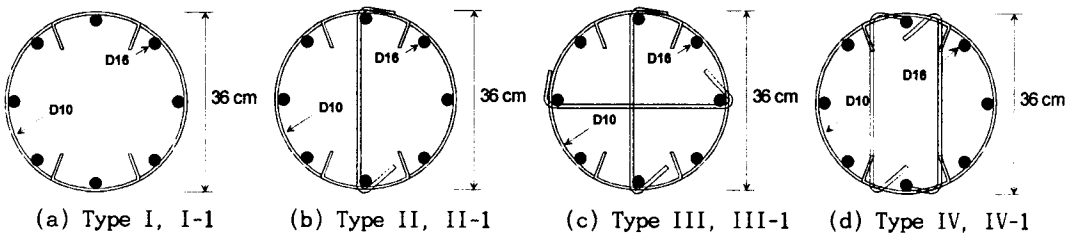


그림 2.2 원형띠철근의 구성

2.3 재하시험

원형단면 철근콘크리트 교각의 내진성능 실험으로 부재에 일정한 축력을 가한 상태에서 횡방향 하중을 반복적으로 가력하는 준정적(Quasi-static) 재하실험을 수행하였다. 횡방향 하중은 MTS사의 50ton 용량의 actuator를 이용하여 가력하였고, 일정한 축력을 가하기 위해 유압잭 2개를 기둥 상단부에 설치하여 $\phi 38\text{mm}$ 의 강봉을 이용하여 축력을 재하하였으며, 상단부에 100ton 용량의 Load cell 2개를 설치하여 축력을 측정하였다. 횡력과 축력이 변화하는 것을 제어하기 위해 Setting 장치 바닥판에 2개의 힌지(hinge)를 설치하였다.

실험시에 횡방향 처짐량을 측정하기 위하여 시험체의 상단부에 시험체의 직각방향으로 3개의 변위계(L.V.D.T.)를 설치하였으며, 소성힌지부분의 곡률을 측정하기 위하여 시험체의 길이방향으로 가력방향과 가력방향의 반대면에 2개씩 총 4개의 변위계(L.V.D.T.)를 설치하였다. 종방향 철근과 횡방향 철근에는 철근의 변형률을 측정하기 위하여 5mm 철근용 변형률계이지를 부착하였다.



사진 2.1 시험체 전경

수명력 재하는 그림 2.3과 같이 각각의 하중과 변위에 대하여 2cycle씩 재하하였고, 처음에는 하중제어를 하여 항복변위 (Δ_i)를 구한 후, 결정된 항복변위를 기준으로 변위제어방식으로 횡변위를 증가시키며 가력하였다.

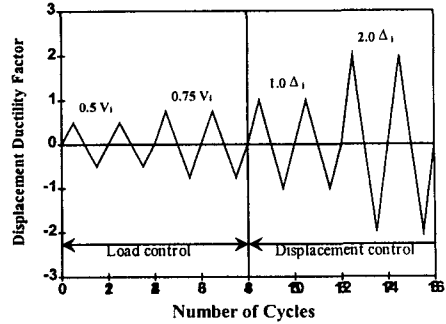
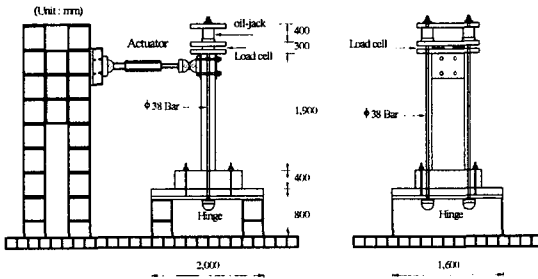
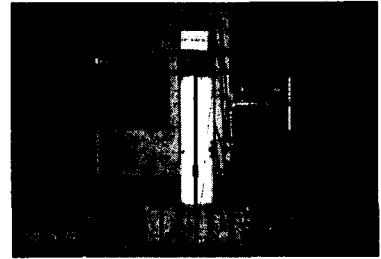


그림 2.3 수명력 재하



(a) 정면도

(b) 측면도



(c) 시험체 setting 장면

그림 2.4 시험체 setting 상세도

3. 실험결과 및 분석

실험결과로 축력비, 원형띠철근의 상세, 보강띠철근의 영향, 갈고리 연장길이 등을 변수로 비교분석하였다.

3.1 파괴양상

25개 원형단면 시험체의 전반적인 균열 및 파괴양상을 요약하면 다음과 같다. 초기균열은 하중 제어 단계인 $0.5V_i$ 와 $0.75V_i$ 일 때 기둥 하단부에서 20~40cm 부근에 주로 발생하였고, 그 후 휨 균열이 계속 진전되면서 $2\Delta_i$ 일 때 초기전단균열이 발생하였다. 시공이음부에서의 초기균열은 $1\sim 2\Delta_i$ 일 때 발생하였으며, 콘크리트의 초기스폴링은 $2\Delta_i$; 2cycle에서 $3\Delta_i$ 정도일 때 모두 압 축연단에서부터 시작되었으며, 초기스폴링이 발생한 후 기둥전면에서 수직균열이 발생하면서 콘크리트 덮개가 박리되기 시작하였다. 종방향철근의 좌굴과 파단현상은 거의 모든 시험체가 $7\sim 8\Delta_i$ 의 변위단계에서 관찰되었다.

심부구속철근의 상세에 따른 시험체의 파괴양상을 사진 3.1에 나타내었다. CN-C0 시험체는 최대횡력 이후 심부가 많이 파괴된 반면, CN-C3 시험체는 심부파괴를 보이지 않았다.

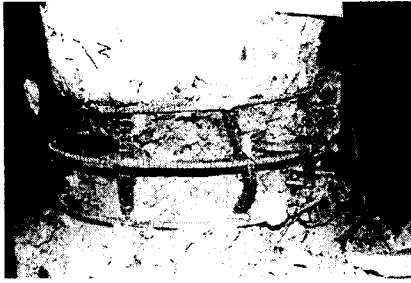


사진 3.1 CN-C0-80-20, CN-C3-80-20 시험체의 파괴양상

3.2 하중-변위 이력곡선

실험시 측정된 하중-변위 이력곡선을 축력비와 원형띠철근 상세, 갈고리 연장길이에 따라 다음과 같이 비교된다.

3.2.1 축력비의 영향

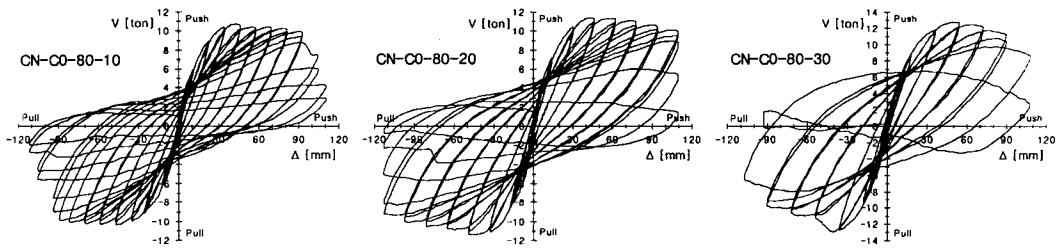


그림 3.1 CN-C0-80-10, CN-C0-80-20, CN-C0-80-30 시험체의 하중-변위 이력 곡선

3.2.2 원형띠철근 상세의 영향

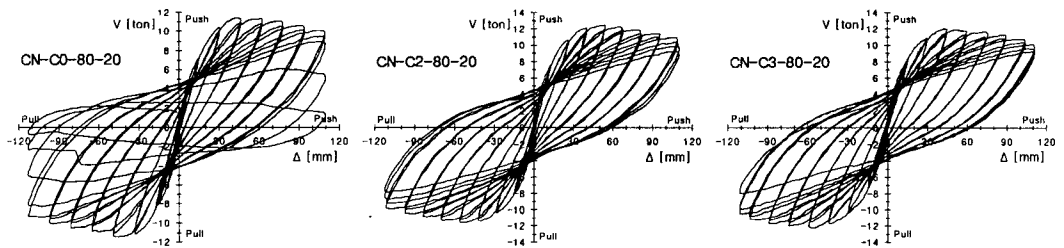


그림 3.2 CN-C0-80-20, CN-C2-80-20, CN-C3-80-20 시험체의 하중-변위 이력곡선

3.2.3 갈고리 연장길이의 영향

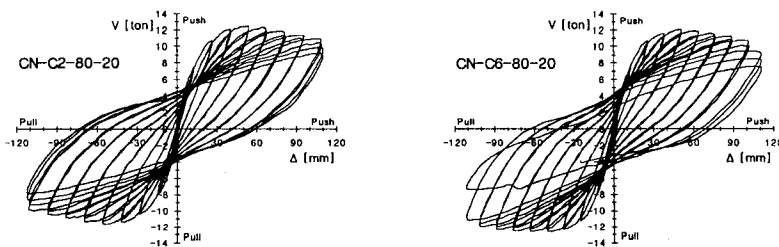


그림 3.3 CN-C2-80-20, CN-C6-80-20 시험체의 하중-변위 이력곡선

3.3 변위연성계수

Paulay & Priestley⁽⁸⁾의 제안에 따라 하중-변위 곡선상에서 설계모멘트강도(M_n)에 해당하는 횡력(V_i)을 지나는 수평선과 원점에서 설계모멘트강도(M_n)의 75%에 해당하는 횡력($0.75V_i$)을 지나는 직선과의 교점을 항복변위(Δ_y)로 정의하여 하중-변위 곡선을 2개의 직선으로 (Bi-linear) 이상화하였다. 시험체의 하중-변위 이상화곡선에 대한 변위연성계수는 표 3.1과 같다.

표 3.1 변위연성계수

시험체번호	시험체명	Δ_i	Δ_y		Δ_u		μ_Δ		평균	재하축력비 $P/f_{cu}A_g$
			Push	Pull	Push	Pull	Push	Pull		
1	CN-SP-60-10	14	13.6	-14.9	110.3	-110.2	8.11	7.40	7.76	0.096
2	CN-SP-60-20	15	15.3	-16.7	110.6	-111.3	7.23	6.66	6.95	0.199
3	CN-SP-60-30	13	14.1	-14.7	109.9	-90.6	7.79	6.16	6.98	0.303
4	CN-SP-80-10	13	16.0	-12.1	107.5	-111.1	6.72	9.18	7.95	0.099
5	CN-SP-80-20	12	13.1	-12.5	98.3	-102.3	7.50	8.18	7.84	0.209
6	CN-SP-80-30	13	13.9	-13.9	96.0	-82.6	6.91	5.94	6.43	0.299
7	CN-SP-100-10	12	13.9	-14.5	100.6	-103.2	7.24	7.12	7.18	0.101
8	CN-SP-100-20	14	16.7	-13.7	101.1	-90.5	6.05	6.61	6.33	0.200
9	CN-SP-100-30	14	15.7	-14.5	74.3	-59.4	4.73	4.10	4.42	0.303
10	CN-C0-80-10	11	13.2	-13.1	103.5	-93.8	7.84	7.16	7.50	0.100
11	CN-C0-80-20	15	17.2	-14.4	108.2	-110.7	6.29	7.69	6.99	0.205
12	CN-C0-80-30	16	18.7	-16.8	90.1	-90.4	4.82	5.38	5.10	0.303
13	CN-C1-80-10	11	12.7	-15.3	108.7	-111.3	8.56	7.27	7.92	0.109
14	CN-C1-80-20	14	16.9	-14.4	109.6	-111.4	6.49	7.74	7.12	0.212
15	CN-C1-80-30	15	14.3	-15.7	95.0	-95.3	6.60	6.07	6.34	0.305
16	CN-C2-80-10	11	11.2	-14.1	109.8	-111.3	9.80	7.89	8.85	0.098
17	CN-C2-80-20	13	13.7	-14.0	108.4	-111.2	7.91	7.94	7.93	0.198
18	CN-C2-80-30	15	15.7	-13.9	92.4	-97.4	5.89	7.01	6.45	0.301
19	CN-C3-80-10	10	11.1	-11.1	106.1	-103.7	9.56	9.34	9.45	0.099
20	CN-C3-80-20	14	12.5	-16.5	109.5	-110.4	8.76	6.69	7.73	0.202
21	CN-C3-80-30	16	15.2	-17.9	110.1	-110.3	7.24	6.16	6.70	0.301
22	CN-C4-80-20	12	12.7	-13.9	88.5	-88.6	6.97	6.37	6.67	0.210
23	CN-C5-80-20	14	14.7	-14.8	103.8	-104.5	7.06	7.06	7.06	0.202
24	CN-C6-80-20	12	13.9	-13.3	110.9	-110.4	7.98	8.30	8.14	0.202
25	CN-C7-80-20	12	11.2	-14.7	111.6	-108.8	9.96	7.40	8.68	0.202

그림 3.4는 횡방향철근 상세와 축력비에 따른 변위연성계수를 보이는데 횡방향철근 상세에 따른 경향을 보면, C0, C1 시험체의 경우 도로교표준시방서 규정보다 횡방향철근의 양이 적은 CN-SP-100 시험체에 가까운 반면, C2, C3 시험체의 경우 도로교표준시방서 규정대로 설계된 CN-SP-80 시험체와 유사함을 보인다. 하중-변위 곡선의 비교 분석결과와 마찬가지로 C2, C3 원형 띠철근기둥이 C0, C1 원형띠철근기둥보다 연성능력 및 성능이 좋은 것으로 판단된다.

전반적으로 보면, C0, C1의 원형띠철근상세보다 C2, C3의 철근상세가 나선철근기둥과 유사한 경향을 보이므로 횡방향철근을 나선철근 대신 원형띠철근을 사용할 경우 C2와 C3의 상세를 갖는 원형띠철근을 사용할 수 있다고 판단된다.

축력비에 대하여는 모든 시험체가 축력비가 증가할수록 연성계수가 감소하는 경향을 보인다. 특히, C0 원형띠철근 시험체와 CN-SP-100 시험체의 경우 축력비가 0.3일 때 급격히 감소하는 경향을 나타내었는데 실험시에도 심부 콘크리트의 파괴가 매우 심하게 발생하였다. 따라서, 축력비가 낮은 경우에 적절한 식의 제안이 필요하며 축력비를 변수로 한 적절한 심부구속철근량 식의 제안이 필요한 것으로 판단된다.

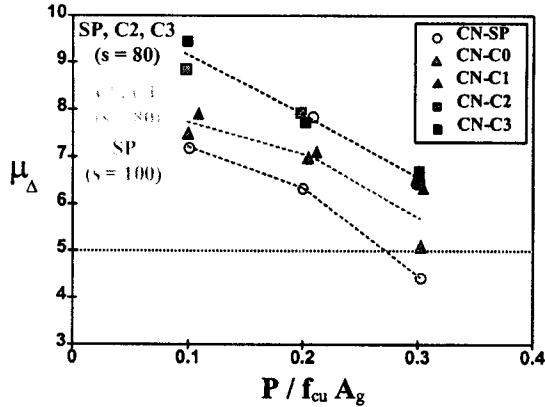


그림 3.4 변위연성계수의 비교

3.4 갈고리 상세

그림 3.5에 나타난 바와 같이 원형띠철근의 갈고리 길이를 $6d_b$ 로 한 시험체와 $12d_b$ 로 한 시험체는 변위연성계수가 유사한 경향을 보인다. 따라서 $6d_b$ 의 갈고리 길이가 띠철근의 연장길이에 적절한 것으로 판단된다.

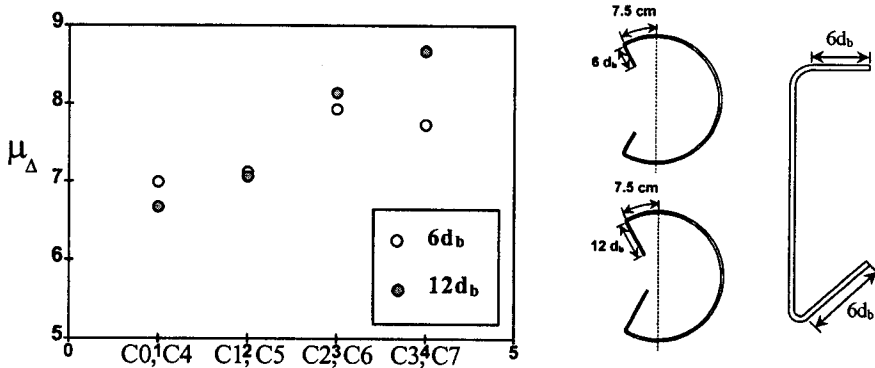


그림 3.5 갈고리 연장길이에 따른 경향

또, 보강띠철근의 갈고리 상세의 경우 본 연구에서 사용한 $135^\circ + 90^\circ$ 갈고리를 사용해도 성능이 떨어지지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 갈고리를 사용하면 현장실무에서 시공성이 다소 향상될 것으로 판단된다.

4. 결론

원형띠철근 기둥의 내진성능을 평가하기 위한 실험으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 철근콘크리트 기둥 시험체에 대한 내진성능 실험을 통하여 축력, 횡방향철근의 간격 및 양, 횡방향철근의 구성 등에 따른 내진성능의 경향을 파악하였다. 실험결과 분석을 통하여, 시방서 규정에 따른 심부구속철근을 배근한 철근콘크리트 교각은 충분한 연성거동 및 내진성능을 발휘할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 본 연구를 통하여 심부구속철근 요구량의 현행 설계기준을 더욱 합리적으로 개정할 수 있다는 가능성을 확인하였다. 즉, 교각에 작용하는 축력비가 약 0.25 미만인 경우에는 심부구속철근

량을 현행 설계기준보다 다소 감소시켜도 내진거동에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 따라서, 이를 위한 실험적인 연구가 추가된다면 경제성, 시공성 및 안전성을 고려한 합리적인 심부구속철근 요구량의 계산식을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 횡방향철근의 갈고리 연장길이를 $6d_b$ 로 한 시험체와 $12d_b$ 로 한 시험체의 내진성능은 별 차이를 보이지 않으므로 갈고리 연장길이를 $6d_b$ 로 사용하여도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 또한 보강띠철근 양단의 갈고리 상세로 $135^\circ+90^\circ$ 의 철근상세를 사용하여도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.
- 4) 원형단면 철근콘크리트 교각의 설계 및 시공 시, 본 시험체의 심부구속철근 상세인 C2나 C3와 같은 원형후프띠철근과 보강띠철근을 사용한다면 나선철근기둥과 동등한 내진성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 실무설계에 적용하기 위하여는 본 연구에서 실험된 시험체보다 단면의 크기가 큰 시험체에 대한 성능실험을 수행하여 크기효과를 검증하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 5) 실험결과, 심부구속철근량이 감소할수록 파괴구간의 길이가 증가하며 축력비가 증가함에 따라 파괴구간의 길이가 증가하였다. 따라서 합리적인 심부구속철근의 배근구간을 도출하기 위해서는 이를 주목적으로 하는 실험적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로연구소의 지원으로 수행되었기에 한국도로공사의 연구비 지원에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 대한토목학회, "도로교표준시방서", 1996.
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준(안)", 1999.
3. 한국도로교통협회, 지진공학연구센터, "도로교설계기준(안)", 1999.
4. ATC-32, "Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations," *Applied Technology Council*, California, USA, 1996.
5. Eurocode 8 Part 2, "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges," *European Committee for Standardization*, 1996.
6. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges," *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 16-th edition, Washington, D.C., USA, 1995.
7. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
8. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992.
9. 이재훈, "철근콘크리트 교각의 내진설계 예제 및 해설", 한국도로공사 세미나, 1999. 2.
10. 권영봉, 이재훈, "고강도 콘크리트를 이용한 철근콘크리트 기둥과 합성기둥의 설계, 해석프로그램의 개발 및 모형실험", 한국도로공사, 도로연구소, 최종보고서, 1999.12.
11. 이재훈, 배성용, 손혁수, "철근콘크리트 교각 심부구속철근량의 비교연구", 한국지진공학회, 1999년도 춘계학술발표회 논문집, 제 3권 제 1호, 1999.3., pp 239~246.
12. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적실험", 한국지진공학회 논문집, 제 3권 제 2호, 1999.6, pp 55~66.