

나선철근교각의 내진성능에 관한 연구

A Study on Seismic Performance of Spiral Pier

배 성 용* 김 광 수** 이 형 준*** 이 재 훈****
Bae, Sung Yong Kim Kwang Soo Lee, Hyoung Jun Lee, Jae Hoon

ABSTRACT

The Korean Bridge Design Standard Specifications adopted the seismic design requirements in 1992. However, The current seismic design requirements for bridges are based on the USA seismic codes for severe earthquake. This paper provides the basic factors that affects the performance of spiral reinforced concrete piers for seismic loading, and The specimen tests are performed based on load-displacement, effective stiffness and displacement ductility, etc. The quasi-static test was adopted in order to investigate seismic performance of the spiral reinforced concrete pier specimens which had different transverse steel amount, spacing and longitudinal steel ratio under different axial load levels.

This study is concluded that seismic design for transverse reinforcement content of spiral reinforced concrete column has influenced on axial load and effective stiffness etc.

1. 서 론

현행 '99도로교설계기준의 내진설계규준은 지진하중이 비교적 큰 강진지역의 경우에 대한 미국의 경험을 반영한 설계지침이라 할 수 있다. 이에 따라서 국내 지진강도의 수준과 비교하여 비경제적인 구조물로 설계되고 있으며, 다른 외국시방서의 경우 EC 8, NZS 3101 및 ATC-32등에서 소성한지영역에 배근되는 횡방향철근량의 산출식을 비교하면, 교각이 지지하는 축력비, 종방향철근비, 연성능력등을 고려하여 구조물의 내진성능에 따라 설계되고 있다. 국내 교량의 교각은 대부분 상부구조물의 자중 및 차량하중등이 작용하는 하중의 축력비는 일반적으로 $0.3f_{ck}A_g$ 이하에서 작용을 받고 있다. 현행 '99 도로교설계기준의 횡방향철근산출식은 축력비를 고려하지 않고 있어 낮은 축력이 작용하는 경우에는 과다 설계된 횡방향철근량으로 인하여 다소 비합리적인 설계를 제공하고 있으며, 현장실무자들에게 많은 어려움을 주고 있는 실정이다. 교량 교각의 충분한 내진성능을 확보하며, 안전하고 합리적인 설계의 내진설계편에 규정하는 심부콘크리트를 구속시키는 횡방향철근량을 만족시키는 나선철근 교각시험체와 현행 규준보다 적고, 많이 설계된 시험체를 제작하여 준정적실험(Quasi-static test)을 통한 나선철근교각의 내진성능을 비교분석하고자 한다.

* 정희원, 영남대 토목공학과 박사과정
** 정희원, 영남대 토목공학과 석사과정
*** 정희원, 한국도로공사 책임연구원
**** 정희원, 영남대 토목공학과 조교수

2. 나선철근교각의 횡방향철근 시방서규준

지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 기둥이나 교각 교각에서의 소성힌지 영역에서는 콘크리트 코어부분의 구속효과를 증대시키고 종방향철근의 좌굴을 방지하며, 특히 구조물의 충분한 연성을 확보하기 위해 적절한 횡방향철근을 배근하여야 한다. 표 1은 각국의 시방서규준에 따른 횡방향 철근량 및 수직간격을 비교하였다. '99 도로교설계기준은 축력의 영향을 고려하지 않은 반면에 EC 8, NZS 3101 및 ATC-32는 횡방향 철근량을 축력의 정도에 따라 구분하고 있으며, EC 8에서는 구조물의 연성의 정도를 추가하고 있다. ATC-32와 NZS에서는 종방향철근비를 횡방향철근량을 산출하는데 추가하여 구조물의 성능에 따라 적절한 강도 및 연성을 평가하고 있다. EC 8, NZS 3101 및 ATC-32에 규정된 종방향 철근지름의 6배는 횡방향철근 사이에서 축방향철근이 좌굴되는 것을 방지하기 위한 규정이므로, '99 도로교설계기준과 같이 단순히 15 cm로 제한하는 것보다 축방향철근의 지름을 고려하는 것이 합리적일 것이다.

표 1 시방서규준에 따른 횡방향철근량 및 수직간격

구 분	횡방향철근량	수직간격
'99 도로교설계기준	$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$ 또는 $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$	$s \leq$ 최소단면치수의 $\frac{1}{4}$ 배 $s \leq 15 \text{ cm}$
EC 8	$\omega_{wd,c} = 1.40 \omega_{wd,r}$ $\omega_{wd,r} = 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.07 \geq \omega_{w,min}$ 연성거동(ductile behavior)의 경우, $\mu_c = 13$ $\omega_{w,min} = 0.12$ 한정연성거동(limited ductile)의 경우, $\mu_c = 7$ $\omega_{w,min} = 0.08$	$s \leq$ 단면지름의 $\frac{1}{5}$ 배 $s \leq$ 축방향 철근지름의 6배
NZS 3101	$\rho_s = \frac{(1.3 - p_1 m) A_g f'_c}{2.4 A_c f_{yt}} \frac{N^*}{\phi f'_c A_g} - 0.0084$ 또는 $\rho_s = \frac{A_{st}}{110 d''} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b}$	$s \leq$ 단면지름의 $\frac{1}{4}$ 배 $s \leq$ 축방향 철근지름의 6배
ATC-32	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{ce}'}{f_{ye}} \left[0.5 + \frac{1.25 P_e}{f_{ce}' A_g} \right] + 0.13 (\rho_l - 0.01)$ $\rho_s = 0.00026 n_b$	$s \leq$ 최소단면치수의 $\frac{1}{5}$ 배 $s \leq$ 축방향 철근지름의 6배 $s \leq 8 \text{ in (20cm)}$

3. 실험개요

3.1 실험제작 및 실험변수

본 연구에서는 일정한 축력하에서 반복횡하중이 작용하는 보통강도 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하기 위하여 단면의 직경 40cm, 부재단면의 길이 170cm인 원형단면 시험체 12개를 제작하였다. 시험체 제작에 사용된 재료의 특성치를 파악하기 위한 재료실험으로써 콘크리트 압축강도 시험과 철근의 인장시험을 수행하였다. 시험체의 실험시, 콘크리트의 강도발현에 따른 콘크리트강도오차를 최소화하기 위해 재령 60일째부터 실험을 실시하였다. 콘크리트의 평균압축강도(f_{cu})는 280kgf/cm²의 값을 나타내었으며, 종방향철근으로 D16과 D25의 두 종류의 이형철근과 횡방향철근으로 D10의 이형철근을 사용하였다. 시험체에 사용된 이형철근의 항복강도는 D10일 경우 3,666kgf/cm², D16일 경우 각각 3,560kgf/cm², D25인 경우 3,436kgf/cm²로 측정되었다. 본 실험의 주요변수는 횡방향철근량, 간격,

축력비 및 종방향철근비 등의 영향으로 철근콘크리트교각의 내진거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험을 수행하였으며, 표 2는 나선철근기둥의 종방향철근량과 횡방향철근량 등에 관한 시험체 상세 및 실험변수를 나타내었다. 시험체의 횡방향철근량은 '99도로교설계기준에 따라 설계하여 CN-SP-80 series를 비교대상으로 하였다.

표 2 나선철근기둥의 시험체 상세

시편명	종방향철근	심부구속철근		실제배근비/도로교설계기준비
		수직간격	ρ_s	
CN-SP-60-10	8-D16 $A_s = 15.89 \text{ cm}^2$ $\rho_g = 1.26\%$ cover = 2cm	6cm	0.0132	140%
CN-SP-60-20				
CN-SP-60-30				
CN-SP-80-10		8cm	0.0099	105%
CN-SP-80-20				
CN-SP-80-30				
CN-SP-100-10		10cm	0.0079	84%
CN-SP-100-20				
CN-SP-100-30				
CNH-SP-60-20	8-D25 $A_s = 40.54 \text{ cm}^2$ $\rho_g = 3.23\%$ cover = 2cm	6cm	0.0132	140%
CNH-SP-80-20		8cm	0.0099	105%
CNH-SP-100-20		10cm	0.0079	84%

그림 1에서 나타낸바와 같이 NZS 3101규준은 '99도로교설계기준보다 상당히 적은 횡방향철근량을 요구하고 있는 것으로 분석되었으며, 본 시험체의 단면인 경우 축력비가 0.21이하일때에 종방향철근의 좌굴을 방지하기 위해 최소 횡방향철근량을 배근하도록 규정하고 있다. 현행 '99도로교설계기준은 지진발생경험과 이에 대한 연구실적이 상당히 많은 뉴질랜드의 시방서규준(NZS 3101)과 비교해보면 종방향철근비가 1.26%일 경우, 축력비가 0.1 및 0.2일 때는 약 3.96배 정도, 축력비가 0.3일 때는 약 1.32배 정도 과대하게 배근하고 있다. 종방향철근비가 3.23%일 경우 축력비가 0.2이면 2.61배 정도 과대하게 배근되고 있는 것으로 분석된다.

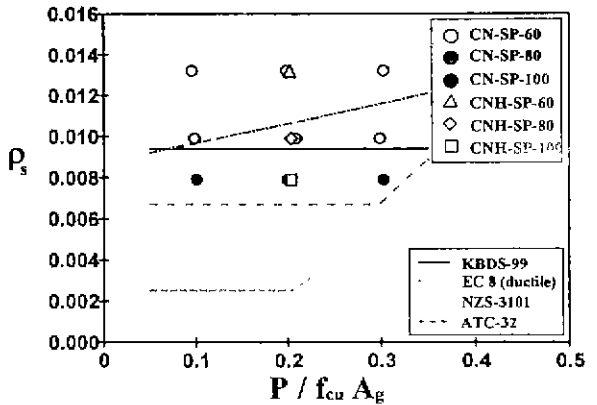


그림 1 시방서규준에 따른 횡방향철근비 비교

3.2 재하실험

철근콘크리트 교각의 내진성능 실험으로 부재에 일정한 축력을 가한 상태에서 횡방향 하중을 반복적으로 가력하는 준정적(Quasi-static) 재하방법을 채택하였다. 횡방향 하중은 MTS사의 50ton 용량의 가력기(actuator)를 이용하여 가력을 하였고, 일정한 축력을 가하기 위해 유압잭(hydraulic jack) 2개를 기둥 상단부에 설치한후 $\phi 38\text{mm}$ 의 강봉을 이용하여 축력을 재하하였다. 횡방향 하중 가력방법은 그림 2와 같이 하중제어와 변위제어방식의 두단계로 하였으며, 초기에는 항복변위를 구하기 위해 하중제

어를 하여 항복변위를 결정한 후, 항복변위를 기준으로 변위제어방식으로 변위를 증가시키며 가력하였다. 실험시 그림 2와 같이 단면해석을 통해 구한 공칭모멘트강도(M_n)에 해당하는 횡력(V_i)을 결정한 후 $0.5V_i$, $0.75V_i$ 의 하중만큼 수평력을 재하하여 $0.75V_i$ 일 때의 변위 Δ' 를 구한 후 $\Delta'/0.75$ 를 하여 항복변위(Δ_i)를 결정하였다. 항복변위를 결정한 후, $1\Delta_i, 2\Delta_i, 3\Delta_i, \dots$ 의 변위제어방법으로 각 Δ_i 마다 2cycle씩 반복하여 하중을 가력하였다.

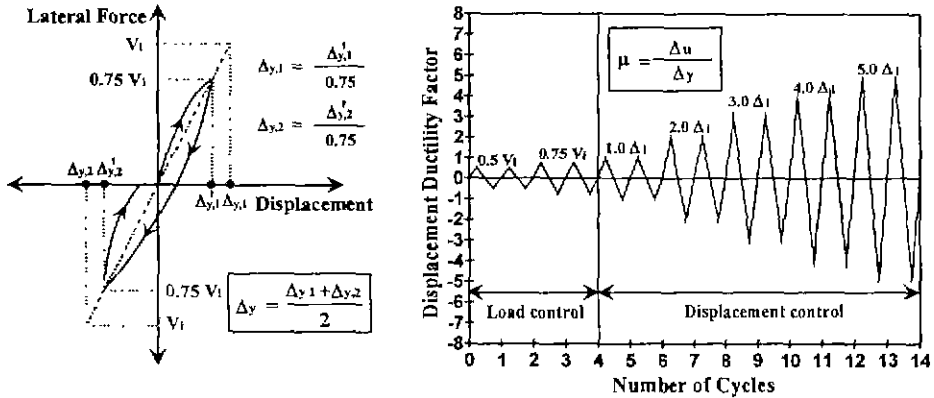


그림 2 항복점 변위정의 및 횡하중 가력방법

4. 실험 결과 및 분석

4.1 축력비의 영향

횡방향철근은 '99도로교설계기준에 만족하도록 설계를 하였으며, 시험체의 횡방향철근비는 동일하게 제작되었다. CN-SP-80시험체의 하중-변위이력곡선을 그림 3~4에서 비교하였다. CN-SP-80-10인 시험체가 다른 시험체보다 연성능력과 에너지분산능력이 높은 것으로 나타내었다. 축력이 높은 CN-SP-80-30인 시험체는 하중-변위이력곡선의 descending부분이 급하게 낮아지는 것을 관찰할 수 있으며, 축력비가 높을수록 낮은 축력비를 작용하는 시험체의 하중변위와 유사한 내진능력을 발휘하기 위해서는 심부콘크리트를 구속시키는 횡방향철근량을 증가해야 할 것으로 판단된다. 본 시험체들의 변위연성지수(μ_d)는 CN-SP-80-10 및 CN-SP-80-30인 경우 Push와 Pull방향의 변위연성지수를 평균하여 각각 7.95, 및 6.43으로 분석되었다. 시험체의 축력이 증가할수록, 횡방향하중은 증가하며, 강성 및 연성은 감소하는 경향을 나타내었다.

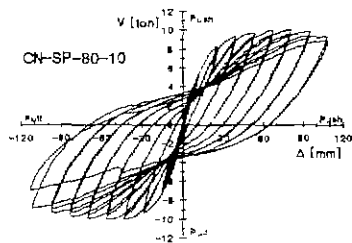


그림 3 CN-SP-80-10

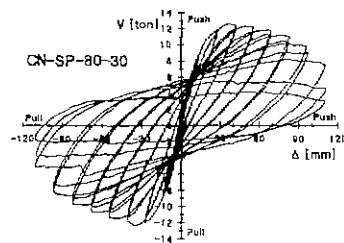


그림 4 CN-SP-80-30

4.2 횡방향철근량 및 간격의 영향

횡방향철근량은 심부콘크리트를 구속하여 횡구속압을 증가시키는데 매우 중요한 역할을 하며, 횡방향철근의 간격은 종방향철근의 좌굴에 상당한 영향을 미친다. 축력단계를 $0.2f_{cu}A_g$ 로 일정하게 유지한 상태에서 횡방향철근량을 변수로 하기위해 D10 이형철근으로 횡방향철근의 간격을 60mm와 100mm로 2개의 시험체를 비교하였다. 횡방향철근의 간격이 넓은 CN-SP-100-30인 시험체의 경우는 횡하중이 반복작용으로 인한 종방향철근이 인장과 압축을 받아 좌굴이 반복적으로 발생하여 피로 (fatigue)가 다른 시험체보다 많이 발생하는 것을 관찰되었다. 다른 시험체 보다 간격이 넓은 시험체는 연성능력 및 에너지분산능력이 저하되는 것으로 분석되었다. 따라서 CN-SP-100-30인 시험체의 구속효과가 떨어져 최종적인 파괴상태는 심부구속콘크리트가 상당히 많은 손상을 받는 것을 관찰하였다.

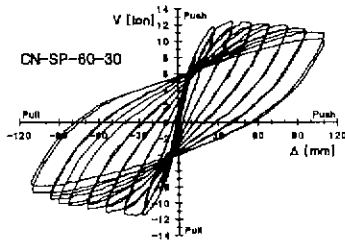


그림 5 CN-SP-60-30

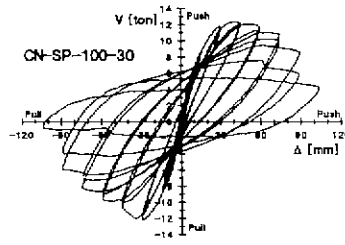


그림 6 CN-SP-100-30

4.3 종방향철근비의 영향

높은 종방향철근비가 3.23%인 시험체의 내진성을 평가하기 위해 종방향철근비가 1.26%인 시험체와 비교하기 위해 축력단계는 $0.2f_{cu}A_g$ 상태에서 횡방향철근량을 동일하게 배근하였다. 그림 7~8에서 나타낸 것처럼 종방향철근비가 높은 CNH series의 시험체는 종방향철근비가 낮은 CN series의 시험체보다 연성능력이 떨어지는 것으로 관찰되었다. 종방향철근비가 높고 횡방향철근량이 많은 CNH-SP-60-20인 시험체는 다른 시험체보다 덮개콘크리트의 박리현상은 건조수축량의 차이로 인하여 빨리 진전되는 것으로 관찰되었으며, 종방향철근비가 낮은 CN series의 시험체보다 심부콘크리트의 구속효과가 종방향철근에 의해 증가하는 것으로 판단된다.

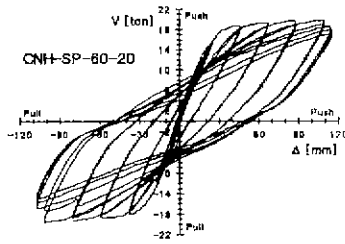


그림 7 CNH-SP-60-20

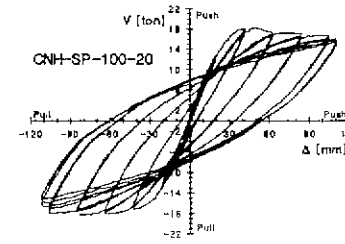


그림 8 CNH-SP-100-20

4.4 변위연성계수 및 유효강성

그림 9는 축력비와 변위연성계수의 관계를 나타내고 있다. 전반적으로 축력비가 높아질수록 변위연

성계수가 작아지는 것으로 분석되었다. '99도로교설계기준의 횡방향철근 요구량을 만족하는 CN-SP-80 series의 시험체는 충분한 연성능력을 있는 것으로 나타났다. '99도로교설계기준의 요구조건을 만족하지 못하는 CN-SP-100 series의 시험체도 축력단계가 $0.25f_{cu}A_g$ 이하일 때는 충분한 연성거동을 하는 것으로 분석되었으나, 축력단계가 $0.25f_{cu}A_g$ 이상일때는 연성거동을 하지 못하는 것으로 나타났다. 현행 '99 도로교설계기준은 횡방향철근량의 계산식이 축력비가 고려되지 않고 있어 다소 축력비가 낮은 상태에서는 과대하게 배근되는 것으로 판단된다. 그림 10에 나타낸 유효강성의 실험결과를 분석하면 축력이 클수록 유효강성이 증가하고 있으며, 종방향철근비가 증가할수록 유효강성은 증가하는 경향을 보였다. 철근콘크리트 교각의 내진설계시 응답수정계수(R)를 적용하는 경우, 소성힌지가 발생하는 단면의 최외곽 인장철근이 항복하는 점을 연결한 기둥의 유효강성(I_{eff})을 사용하거나, $0.5I_g$ 를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

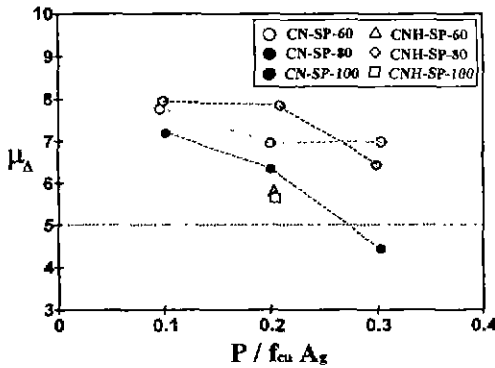


그림 9 변위연성계수

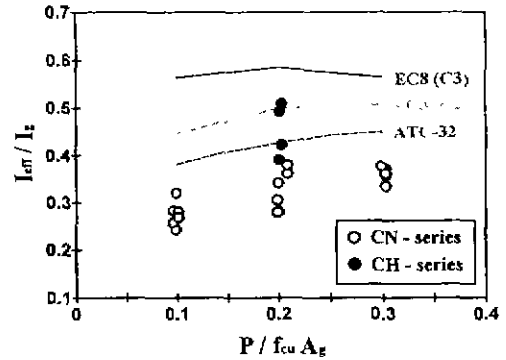


그림 10 유효강성

5. 결 론

1. 철근콘크리트 기둥 시험체에 대한 내진성능 실험을 통하여 축력비, 횡방향철근의 간격 및 양, 종방향철근비 등에 따른 내진성능의 경향을 파악하였으며, 현행 시방서 규정에 따른 횡방향철근량을 배근한 철근콘크리트 교각은 충분한 연성거동 및 내진성능을 발휘할 수 있음을 확인하였다.
2. 철근콘크리트 교각에 작용하는 축력비가 약 0.25 미만인 경우에는 심부구속철근량을 현행 설계기준보다 다소 감소시켜도 내진거동에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.
3. 실험결과 기둥의 유효강성(I_{eff})이 전단면강성(I_g)의 0.5 이하의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 철근콘크리트 교각의 내진설계시 응답수정계수를 적용하는 경우, 구조해석 시에 기둥의 유효강성을 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 실무설계에서 해석을 통하여 유효강성을 구하기 어려운 경우에는 $0.5I_g$ 를 사용하여도 안전측일 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국도로공사의 1999년도 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.