

## 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 I. 심부구속철근비 영향 변수 평가

이대형<sup>1)</sup>·박창규<sup>2)\*</sup>·김현준<sup>2)</sup>·정영수<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>경도대학 토목과 <sup>2)</sup>중앙대학교 토목공학과

(2005년 4월 18일 원고접수, 2005년 7월 14일 심사완료)

### A Seismic Performance Analysis of Circular RC Bridge Piers I. Evaluation of Influence Parameters of Confinement Steel Ratio

Dae-Hyoung Lee<sup>1)</sup>, Chang-Kyu Park<sup>2)\*</sup>, Hyun-Jun Kim<sup>2)</sup>, and Young-Soo Chung<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil, Gyeongdo Provincial College, Yechon, 757-807, Koera

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, 456-756, Korea

(Received April 18, 2005, Accepted July 14, 2005)

#### ABSTRACT

For the establishment of rational seismic design code for RC (reinforced concrete) bridge pier, this paper has analyzed the seismic code of RC bridge pier specified in well-known codes such as KHBDS (Korea Highway Bridge Design Specification), AASHTO Standard, ATC-32, Eurocode 8, NZS 3101, etc. So as to secure aseismic ductility of RC pier, transverse confinement steel ratios of those codes have been examined together with other design parameters such as strength of concrete and reinforcing steel, axial force ratio, aspect ratio, longitudinal steel ratio, etc. However, there has been arisen a doubt for the validity of those parameters. Thus, the objective of this study is to quantitatively evaluate the validity of design parameter of each code on the experimental seismic ductility for about 80 test specimens. It was concluded from this study that the axial force ratio is a dominant factor for the seismic displacement ductility. Therefore, it is desirable that the axial force ratio be further taken into account in the corresponding seismic design formula of RC bridge pier in current KHBDS.

**Keyword :** circular RC bridge pier, evaluation of seismic performance, influence factor, axial force ratio, confinement steel ratio

#### 1. 서 론

현행 도로교설계기준<sup>1)</sup>의 내진설계에 대한 기본 개념은 지진시 인명 피해를 최소화하고 구조물의 부분적인 피해는 허용하나 완전 붕괴는 허용하지 않으며 기본적인 기능은 발휘할 수 있도록 하는 것이다. 즉, 붕괴를 방지하기 위해서는 구조물이 취성이 아닌 연성거동을 하여야 한다. 지진발생시 도로교의 연성거동 개념은 교량의 상부구조에서는 탄성거동을 보이고 교량 하부구조에서는 소성힌지가 형성되어 비탄성거동이 일어나도록 한다는 것이다. 철근콘크리트 교각에서는 전단파괴나 큰 강도의 손실 없이 상대적으로 큰 연성거동이 일어나도록 하기 위해서는 콘크리트 교각의 소성힌지구간에 적절한 심부구속철근을 배근하여야 한다. 이러한 심부구속철근은 주철근의 좌굴을 방지하고 교각 전체의 전단파괴를 방지하여 연성을 확보하게 한다. 따라서 각국의 설계기준에서는 소성힌지 구간에서

심부구속철근량에 대한 규정을 명시하고 있다. 우리나라에서는 1992년 도로교표준시방서에 내진설계편이 도입된 이후, 철근콘크리트 교각에서 심부구속철근의 과도한 배근으로 시공상에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이러한 원인으로서는 정영수<sup>2)</sup> 및 이재훈<sup>3)</sup>등 관련 연구자들이 지적한 바와 같이 심부구속철근량에 대한 현행 국내 기준이 너무 과도하게 규정되어 있다는 것이며, 이는 별다른 검증 없이 외국의 강진지역의 규정을 인용한 결과로 사료된다. 또한 이재훈 등<sup>4)</sup>은 형상비가 1.8, 2.5 및 4.0의 실물원형 철근콘크리트 교각에 대한 내진성능을 평가한 결과, 형상비 1.8인 경우 전단파괴가 발생하고, 형상비 2.5인 경우 초기에는 소성힌지구간에 휨파괴가 발생하고, 횡방향 철근이 부족할 경우 전단파괴가 발생하는 것으로 보고한바 있다.

Asad et al.<sup>5)</sup>은 6개의 원형 철근콘크리트 기둥 실험체를 제작하여 축하중비를 0.0 및 0.3으로 하는 축하중을 재하하여 준정적 실험을 실시하였다. 이들은 축하중이 철근콘크리트 교각의 휨강도에 큰 영향을 미치며 과도한 콘크리트의 파괴를 야기하므로 필요한 연성을 확보하기 위해서는 추가의 심부구속철근이 필요하다고 보고하였다. Nadim

\* Corresponding author

E-mail : pcg2213@wm.cau.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

et al.<sup>6)</sup>은 중저진 지역에서 철근콘크리트 교각의 내진규정을 확립하기 위하여 AASHTO 내진규정의 46~60%의 횡구속철근비를 갖는 직사각형 단면의 교각에 대하여 실험 연구를 수행한 바 있다. 실험 결과 교량과 같이 낮은 축하중하에서는 AASHTO 규정의 50%만의 횡구속철근비로도 요구연성도 5를 만족한다고 보고하고 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 국내 도로교설계기준에서 제시하는 심부구속철근비의 기준이 철근의 항복강도에 대한 콘크리트의 설계기준강도 비와 심부구속콘크리트의 단면적에 대한 교각의 총 단면적의 비로만 규정되어 있으므로 추가로 내진성능에 영향을 미치는 영향인자들을 도출하여 새로운 합리적인 심부구속철근비 식을 제안하는 것이다. 이를 위하여 심부구속철근량의 산정에 큰 영향을 미치는 인자들인 축하중비, 형상비, 재료강도비 그리고 주철근비가 내진 연성능력에 미치는 영향을 국내·외 실험 연구 결과를 바탕으로 정량적으로 평가하고 분석하였다. 또한

이들 실험 결과를 각국 설계기준의 요구 심부구속철근비와 비교하였으며, 이러한 연구 결과를 이용하여 더욱 합리적인 내진 심부구속철근비에 관한 기준을 제시하고자 하였다.

## 2. 국내 및 국외의 내진규정 분석

주요 각국의 내진규정에서 정하고 있는 심부구속철근량의 산정식을 Table 1에 비교 정리하였으며, 심부구속철근량 산정식에 사용되는 변수를 다음 Table 2와 같이 정리하였다. Table 2에서 기호 “○”은 Table 1에서 고려하고 있는 변수를 나타내며, 기호 “●”은 일반적인 교각 설계시 고려되고 있는 변수를 나타낸 것이다. 이 변수들 중에서 콘크리트 압축강도, 횡방향철근의 항복강도, 심부 콘크리트 단면의 치수 및 비율 등은 모든 설계기준에서 공통적으로 고려하고 있으나, 축하중비는 도로교설계기준 및

**Table 1** Required volumetric ratio of transverse confinement steel

Design code	Required volumetric ratio of transverse steel	Remark
KHBDC <sup>1)</sup> (2000) AASHTO <sup>7)</sup> (2002) CSA Standard <sup>8)</sup> (1994) ACI 318-02 <sup>9)</sup> (2002)	$\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y}, 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y} \right],$	
ATC-32 <sup>10)</sup> (1996)	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{ce}}{f_{ye}} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_t - 0.01) \quad \text{for } H/D \leq 4$ $\rho_s = \text{Max} \left[ 0.16 \frac{f_{ce}}{f_{ye}} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_{ce} A_g} \right) + 0.13(\rho_t - 0.01), 0.0002n_b \right] \quad \text{for } H/D > 4$	$n_b$ : number of longitudinal steel $f_{ce} = 1.3f_c$ $f_{ye} = 1.1f_y$
Caltrans <sup>11)</sup> (2004)	$\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y}, 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_c A_g} \right) \right] \quad \text{for } D \leq 900 \text{ mm}$ $\rho_s = \text{Max} \left[ 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y}, 0.12 \frac{f_c}{f_y} \left( 0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_c A_g} \right) \right] \quad \text{for } D > 900 \text{ mm}$	
Eurocode 8 <sup>12)</sup> (1996)	$\rho_w = \omega_{wd,c} \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$ $\omega_{wd,c} = 1.4 \times \left\{ 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009\mu_c + 0.17)\eta_k - 0.07 \right\} \geq \omega_{w,min}$	$\mu_c$ : curvature ductility Limited ductile = 7 Ductile = 13 $\eta_k$ : axial force ratio
NZS 3101 <sup>13)</sup> (1995)	$\rho_s = \text{Max} \left[ 1.4 \times \left[ \frac{\{(\phi_u/\phi_y) - 33\rho_t m + 22\}}{111} \frac{A_g}{A_c} \frac{f_c}{f_{yt}} \frac{N^*}{\phi f_c A_g} \right] - 0.0084, \frac{A_{st}}{110d'} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b} \right]$	$\phi_u/\phi_y = 20, \rho_t m \leq 0.4$ $\rho_t$ : longitudinal steel ratio $m = f_y/0.85f_c$ $N^*$ : axial force

**Table 2** Parameter of the required volumetric ratio of transverse steel of each design code

Parameters	KHBDC	AASHTO ACI318-02	CSA Standard	ATC-32	Caltrans	Eurocode 8	NZS 3101
$f_c$	○●	○●	○●	○●	○●	○●	○
$f_{yh}$	○●	○●	○●	○●	○●	○●	○●
$A_g/A_c$	○	○	○	○●	○●	○	○
Axial force ratio				○●	○	○	○
Longitudinal steel	Ratio			○●			○
	$f_y$						○●
	Area						○●
	Number				○●		
Diameter							○●
Required curvature ductility						○	○

AASHTO 등을 제외한 모든 식에서 적용하고 있으며, 축방향 철근비는 ATC-32와 NZS3101에서만 고려하고 있다. 특히, 국내 도로교설계기준 및 AASHTO 등에서는 콘크리트의 압축강도 및 횡방향철근의 강도와 심부콘크리트의 단면적비만을 고려하고 있다. 그러나, 기존의 연구결과에 따르면 축하중비는 교각의 내진성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 평가된 바 있으나, 도로교설계기준 등에서는 이러한 인자를 전혀 고려하지 않고 있는 실정이다.

한편, 우리나라에서 실제로 시공되는 철근콘크리트 교각에 맞추어 심부구속 철근량 산정식의 변수를 살펴보면 다음과 같다. 한국도로공사 및 중앙대 등이 공동 연구한 “고속도로 기존 교량의 유형별 내진성능평가를 위한 실험적 연구” 보고서<sup>14)</sup>에 따르면, 우리나라 고속도로 상의 교량 교각에서 원형단면의 직경  $D$ 는 1.8m ~ 3.5m 이고, 높이  $H$ 는 3m ~ 13m 정도로 되어 있다. 그리고 교각에 작용하는 축방향력은  $f_{ck} \cdot A_g$ 의 5 ~ 10% 정도로 낮은 수준이며, 축방향 철근비는 규정에서 1 ~ 8%를 사용하도록 되어 있으나, 직경 D29나 D32 철근으로 철근비 0.53 ~ 2.04%로 배근되어 있다. 이상을 각국의 심부구속철근량 산정식에 재분석해보면 Table 2의 기호“●”와 같다. 도로교설계기준 등과 Eurocode 8의 설계식은 콘크리트와 심부구속철근의 재료강도만을 사용하나, 축력비는 ATC-32에서만

적용하고 있다. 특히 NZS3101는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 조건으로 주철근에 대한 변수를 사용하고 있다.

전술한 바와 같이 각기 다른 내진기준을 비교하기 위해 원형 콘크리트 교각의 소요 구속철근비를 변수별로 비교하였다. Fig. 1은 콘크리트 압축강도  $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$ , 주철근 항복강도  $f_y = 300 \text{ MPa}$ , 주철근비  $\rho_t = 0.01(40D19)$ 인 원형 단면의 교각(직경  $D = 1,200 \text{ mm}$ ,  $D' = 1,060 \text{ mm}$ )인 경우의 축하중비에 따른 각국의 요구구속 철근비를 나타내낸 것이다. Caltrans는 축하중비가 40%이하일 때는 AASHTO의 심부구속철근비 산정식과 동일하게 되어 축하중비의 영향을 전혀 반영하지 못하고 있다. ATC-32의 심부구속철근비는 축하중이 증가함에 따라 일정한 비율로 증가한다. 여기서 다른 설계기준과는 달리 콘크리트의 압축강도 및 철근의 강도를 설계기준 강도가 아닌 기대값을 사용하게 되어  $f'_{ce} = 1.3f'_c$  그리고  $f_{ye} = 1.1f_y$ 를 적용하는 것이 특징이다. Eurocode 8의 심부구속철근비는 축하중비가 25% 이하에서는 최소철근비( $w_{w,min}$ ) 규정에 의해 25% 이상에서는 심부구속철근비 규정식에 의해서 산출된다. NZS3101의 심부구속철근비는 축하중비가 25% 이하에서는 주철근의 좌굴을 방지하기 위한 최소규정식( $\rho_{s,min}$ )을 적용해야 하며 축하중비가 25% 이상에서 축하중비에 따라 선형적으로 구속철근비를 증가시키도록 규정하고 있다.

또한, Fig. 2에서와 같이 주철근비에 따른 심부구속철근비의 경우, ATC-32는 주철근비가 증가할수록 많은 심부구속철근을 요구하고 있다. 특히, NZS3101의 경우에는 주철근비가 증가할수록 심부구속철근비가 감소하도록 되어 있으나  $\rho_t m \leq 0.4$ 에 의해 제한을 받게 되며, 축하중비가 25% 이하에서는 주철근 좌굴 방지를 위한 최소규정에 따라 심부구속철근비가 증가한다. 또한, 축하중비가 30% 이상인 경우에는 주철근비에 따라 각각 다른 규정에 의해 심부구속철근비가 산출된다. 즉, 축하중비가 30%이고 주철근비가 1%인 경우 심부구속철근비 산정식에 의해 산출되다가 주철근비 2% 이후에는 다시 주철근 좌굴 방지를 위한 최소규정에 의해 심부구속철근비가 산출된다. 따라서, NZS 3101에서는 대부분이 심부구속철근비 산정식 보다는 주철근 좌굴방지를 위한 식에 의해 심부구속철근비가 산정된다.

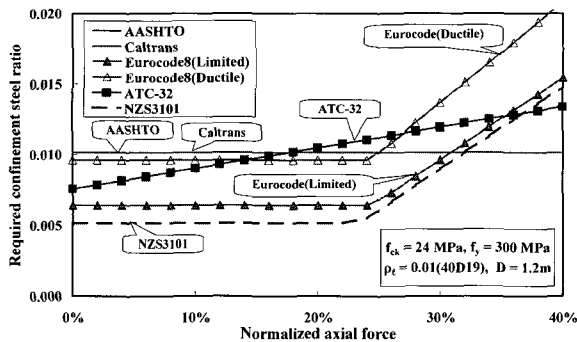


Fig. 1 Required confinement steel ratio in terms of normalized axial force ratio

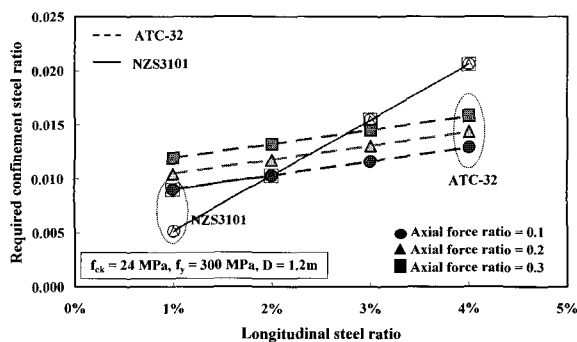


Fig. 2 Required confinement steel ratio in terms of longitudinal steel ratio for ATC-32 and NZS3101

### 3. 내진영향도 분석

주요 내진규정 및 내진영향인자를 비교하기 위하여 기존 연구결과<sup>2-4,15-27)</sup>를 이용하였으며 사용된 실험체의 상세를 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서는 축하중비, 주철근비 및 형상비에 따른 내진영향을 조사하고자 주철근의 겹침이음 및 보강된 실험체는 제외하였다. 또한, 형상

**Table 3** Details of test specimens

Specimens	Diameter (mm) D	Height (mm) H	Aspect Ratio (H/D)	$f_{ck}$ (MPa)	Longitudinal steel		Confinement steel		Axial force ratio $P^* = P/f_{ck}A_g$ (%)	Displacement ductility $\mu_{\Delta}$	Ref.							
					Ratio $\rho_l$ (%)	$f_y$ (MPa)	Ratio $\rho_s$ (%)	$f_{yh}$ (MPa)										
CS1P2L1	500	2,032	4.06	24.2	1.16	400	0.73	300	15	6.29	2)							
CS2P1L1							0.37		9	4.17								
CS2P2L1							0.37		15	5.09								
N-SP00-P1-R0	600	2,400	4.00	29.6	1.13	460	0.19	360	10	6.97	17)							
N-SP00-P2-R0									15	5.27								
N-SP00-P3-R0							20		4.96									
L-SP00-P1-R0							0.47		10	7.46								
S-SP00-P1-R0							0.78		10	10.82	20)							
MS-HT3-N-L2	1,200	4,800	4.00	24.0	1.01	300	0.23	300	7	9.03	21)							
MS-HT4-N-L1										6.37	14)							
MS-HT4-N-L2										9.84	21)							
MS-HT4-N-L3										8.40								
MS-HT4-N-FS		3,000	2.50				7.31			14)								
MS-HT5-N-L2		4,800	4.00				7.53											
MD-HT6-N-L2					2.02		5.61											
MD-HT7-N-L2										0.47	6.07							
DN-SP00-R0	600	1,500	2.50	24.0	1.55	300	0.23	300	10	7.73	18)							
DL-SP00-R0							0.64			9.86								
NS-LP1-A1	500	1,882	4.06	26.1	1.16	387	0.23	350	10	4.79	16)							
ML-LP1-A1										0.64		6.58						
S-LP1-A1										0.96		7.89						
NS-LP2-A1										0.23		3.06						
ML-LP2-A1										0.64		4.10						
S-LP2-A1										0.96		8.89						
S-LP3-A2										15		8.35						
2.5N-SP00-R0	600	1,500	2.50	24.0	1.55	330	0.23	350	10	7.22	*							
2.5S-SP00-R0										11.47	*							
CS-HP50-N		2,100	3.50				3.50			1.12	0.53	1.06	0.24	350	12.64	*		
CS-HP50-S															11.93	*		
S-SP50															8.21	23)		
S-SP100-PW															13.23	22)		
3.5N-SP00-R0															5.79	*		
3.5N-SP00-HK															7.11	*		
3.5L-SP00-p1.12															10.21	*		
3.5L-SP00-p1.55															10.60	*		
3.5L-SP00-p1.97	8.09	*																
3.5S-SP10-PW	1.55	1.06	9.51	*														
CN-SP-60-30	400	1,700	4.25	28.0	1.26	356	0.99	367	30	5.97	3)							
CN-SP-80-20									20	6.43								
CN-SP-80-30									30	5.08								
CN-SP-100-10									10	6.69								
CN-SP-100-20									20	4.59								
CN-SP-100-30									30	3.84								
CN-C0-80-30									30	4.14	15)							
CN-C1-80-30									30	5.39								
CN-C2-80-10									10	8.51								
CN-C2-80-20									20	6.17								
CN-C2-80-30									30	4.28								
CN-C3-80-10									10	7.96								
CN-C3-80-20									20	6.40								
CN-C3-80-30									30	5.11								
CN-C4-80-20									20	5.84								
CN-C5-80-20										5.49								
CN-C6-80-20										6.34								
CN-C7-80-20										7.26								
CNH-SP-60-20										1.32	5.63							
CNH-SP-80-20										0.99	4.39							
CNH-SP-100-20									0.79	4.80	3)							
CN-SP-NC-10									1,400	3.50	29.5	1.26	344	0.40	367	20	6.33	19)
CN-SP-NC-20																10	5.43	
CN-SP-NC-30																30	3.32	
Column 2	610	1,829	3.00	30.0	1.06	462	0.18	361	6	4.00	24)							
No. 1	406	1,829	3.90	49.3	1.17	490	0.52	469	30	6.01	25)							
1a	200	800	4.00	40.7	1.62	450	0.88	260	4	7.10	26)							
1b				32.0						8.70								
2b		1,400	7.00	30.3						1.06		7.90						
3b		2,000	10.00	29.1						0.67		250	6	7.50				
HS4	457	2,415	5.28	32.0	2.50	429	0.82	386	15	8	27)							

\* These are new test results which have not reported in any Journal.

비가 2.5인 실험체의 경우 심부구속철근비의 양에 따라 휨 파괴를 보이기도 하고 전단파괴의 경향을 보이기도 한다. 따라서 본 연구에서는 형상비 2.5 이하의 전단거동이 예상되는 실험체는 제외하고 휨파괴를 보이는 형상비 2.5 이상의 실험체를 대상으로 심부구속철근량을 산정하였다. 항복 변위는 하중-변위 곡선상에서 설계공칭강도( $M_n$ )에 해당하는 횡력( $V_i$ )을 지나는 수평선과 원점에서 공칭휨강도( $M_n$ )의 75%에 해당하는 횡력( $0.75 V_i$ )을 지나는 직선과의 교점을 연결한 직선과의 교점을 항복변위( $\Delta_y$ )로 정의하고 하중-변위 포락곡선에서 최대횡력에 비해 20% 횡력감소가 발생하였을 때의 변위를 극한변위( $\Delta_u$ )로 정의하여 변위연성도를 구하였다. 다만 실험 data를 직접 구할 수 없는 연구자들의 결과는 참고문헌의 연성도를 인용하여 분석하였다.

### 3.1 축하중비

축하중비는 교각의 단면적과 콘크리트 강도비인  $P^*(= P/f_{ck}A_g \times 100, \%)$ 로 정의하였으며, Fig. 3은 축하중비에 따른 변위연성도를 나타내고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 축하중의 증가는 교각의 연성능력 저하를 야기한다. Fig. 3(a) 축하중비가 10%인 경우 심부구속철근량이 0.4% 이상이면 도로교설계기준에서 요구하는 변위연성도  $\mu=5$  이상의 연성능력을 보이고 있다. 그러나, Fig. 3(d) 축하중비가 30% 이상인 경우는 심부구속철근비가 증가하더라도 연성능력의 증가가 미미하며 대부분 도로교설계기준 연성도  $\mu=5$ 를 만족시키지 못하는 것으로 조사되었다. 이러한 결과로부터 축하중이 내진성능에 상당한 영향을 미치고 있으며, 축하중비 10% 이하의 낮은 축하

중비 하에서 현행 내진규정보다 적은 심부구속철근비로도 충분한 연성능력을 발휘하며, 축하중비가 30% 이상일 경우 현행 규정보다 많은 심부구속철근비를 필요로 하는 것으로 판단된다.

### 3.2 형상비

본 연구에서의 형상비 영향은 형상비 2.5에서 10.0까지의 실험결과에 따른 분석으로 제한되었다.

분석 결과 Fig. 4에 보이는 바와 같이 형상비에 따른 변위연성능력의 차이는 발견할 수 없었다. 특히, 정영수 등은<sup>18)</sup> 형상비 2.5인 시험체의 경우 심부구속철근이 0.23%로 작은 경우 초기 휨균열 이후 연성거동을 보이다가 최종에는 전단파괴가 발생하며 취성거동을 나타낸다고 조사하였다. 그럼에도 불구하고 휨파괴 거동인 Fig. 4(b)와 매우 유사한 연성도 결과를 나타내었다.

### 3.3 주철근비

Fig. 5(a),(b)는 축하중비가 10%인 경우, Fig. 5(c) 및 5(d)는 축하중비가 20%인 경우의 주철근비에 따른 변위연성능력을 조사하였다. 두 경우 모두 주철근비가 증가함에 따라 변위연성도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 축하중비가 20%인 경우에 비하여 축하중비가 10%인 경우는 그 영향이 적은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 주철근비의 증가에 따라 심부구속철근비를 선형적으로 증가시키는 ATC-32 규정과 잘 부합되고 있으나, NZS3101 규정의 주철근비 증가에 따른 심부구속철근비의 감소를

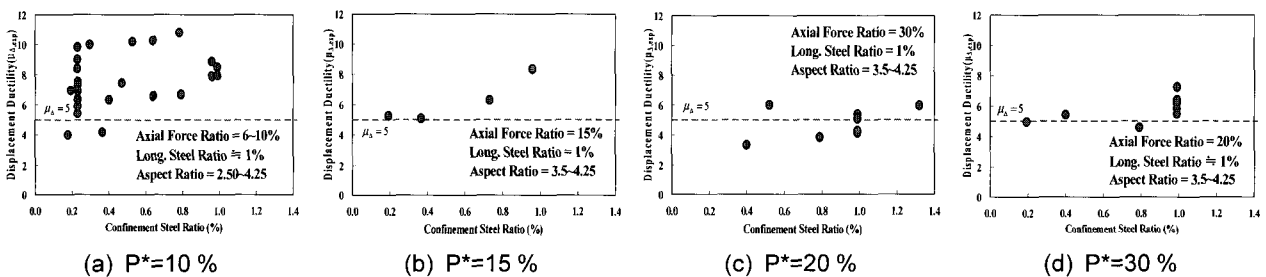


Fig. 3 Experimental displacement ductility in terms of axial force ratio

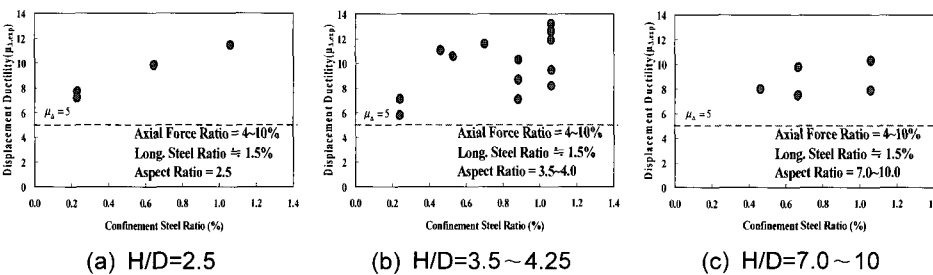


Fig. 4 Experimental displacement ductility in terms of aspect ratio

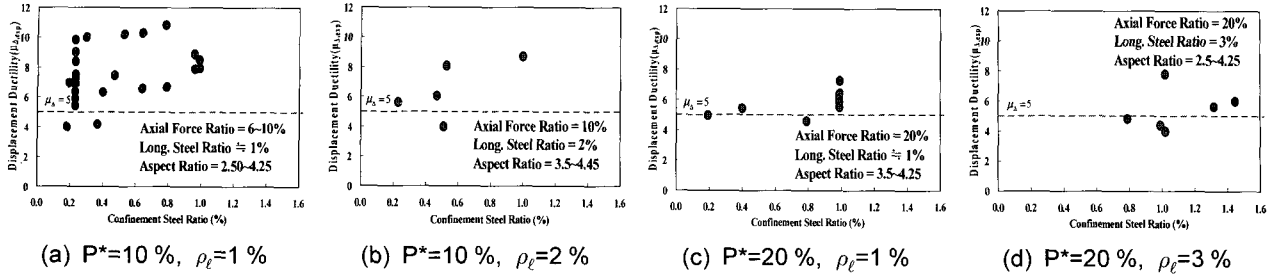


Fig. 5 Displacement ductility of experimental results versus longitudinal steel ratio

보이는 것과는 차이를 보이고 있다.

상기의 연구 결과로부터 철근콘크리트 교각의 변위연성 능력은 축하중비가 지배적임을 알 수 있다. 따라서, 낮은 축하중하에서는 주철근의 좌굴을 방지하는 수준의 동일한 심부구속철근비를 요구하는 것이 합리적이며 축하중비 20% 이상에서는 축하중비에 비례하여 많은 심부구속철근비를 배근하여야 할 것으로 사료된다. 또한 심부구속철근비 식에는 축하중비를 비롯하여 주철근비도 함께 고려해야 한다고 판단된다.

#### 4. 각국의 심부구속철근비에 따른 연성도 분석

본 연구에서 조사된 실험 결과를 대상으로 하여 각국의 심부구속철근비를 정량적으로 평가하였다. 즉, 각 실험체의 심부구속철근비와 변위연성도 실험 결과를 각국의 내진규정에서 요구되는 구속철근비와 변위연성도로 나누어 정규화(normalize)하였다. 다음 Figs. 6~9에서  $\mu_{rqd}$ 는 요구변위연성도,  $\mu_{exp}$ 는 실험결과에 의한 변위연성도이며

$\rho_{rqd}$ 는 요구 심부구속철근비,  $\rho$ 는 실험체의 심부구속철근비를 나타낸다.

Caltrans의 심부구속철근비 산정식은 2장에서 서술한 바와 같이 축하중비가 40% 이하인 경우에는 AASHTO 식과 동일하여 본 장에서의 분석은 제외하였다. 그리고 본 분석에서는 축하중비에 따른 영향이 연성도에 가장 크게 작용하므로 축하중비에 대한 영향만을 분석하였다.

#### 4.1 AASHTO

요구연성도는 단주의 응답수정계수(R)에 식 (1)을 적용하여 이에 해당하는 변위연성도를 구할 수 있다.

$$R = \sqrt{2\mu_{\Delta} - 1} \quad (1)$$

국내 도로교설계기준, CSA Standard, ACI 318-02 및 AASHTO는 동일한 심부구속철근비 산정식을 사용하고 있다. AASHTO의 요구연성도에 대한 실험연성도 비를  $\rho/\rho_{rqd}$ 에 대해서 Fig. 6에 나타내었다.

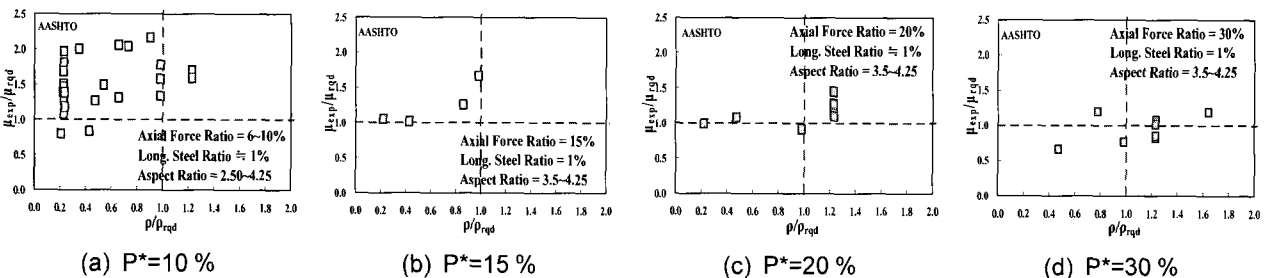


Fig. 6 Displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in AASHTO

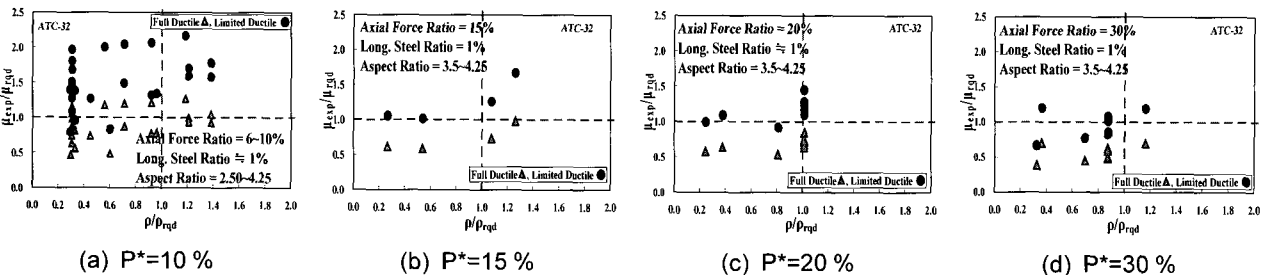


Fig. 7 Displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in ATC-32

분석 결과 Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 10%의 낮은 축하중비에서는 횡철근비에 상관없이 대부분이 요구연성도 “5”를 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 축하중비가 15%, 20%, 30%로 커질수록 Fig. 6(b)~(d)에 보이는 바와 같이 변위연성도비가 낮아지는 경향을 보이고 있으며, Table 4에 보이는 바와 같이 축하중비가 약 30%일 때는 요구철근비 이상이 배근되어야 즉  $\rho/\rho_{reqd} > 1.0$ 이어야 요구연성도를 만족하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 ATC-32

ATC-32는 AASHTO와 달리 축하중비와 주철근비를 요구 심부구속철근비 산정식에 포함하고 있는 것이 특징이며, ATC-32에서 사용되는 응답수정계수는 완전연성일 경우 R=4를, 한정연성일 경우 R=3을 적용함으로 Fig. 7에서의 요구연성도  $\mu_{reqd}$ 은 식(1)에 의해서 완전연성일 경우  $\mu_{\Delta} = 8.5$ , 한정연성일 경우  $\mu_{\Delta} = 5$ 를 적용하였다. Fig. 7 및 Table 4에 보이는 바와 같이 완전연성일 경우 축하중비 10% 이상에서는 현행 기준보다 많은 심부구속철근비를 요구하는 것으로 나타났으며, 한정연성의 경우 축하중비가 30%로 높은 경우 현행 기준의 83% 정도의 심부구속철근비가 필요한 것으로 조사되었다.

#### 4.3 Eurocode 8

Eurocode 8의 요구심부구속철근비에는 축하중비가 포함되어 있으며, 다른 설계기준과는 달리 한정연성 및 완전연성에 대한 요구 곡률연성도가 달리 적용되고 있다. 그리고 요구곡률연성도에 따른 최소철근비가 규정되어 있는

것이 특징이다. 따라서 요구심부구속철근비는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 축하중비가 약 25% 이하인 경우의 요구 심부구속철근비  $\rho_{reqd}$ 는 최소철근비로 결정되며, 25% 이상에서는 심부구속철근비식으로 산출된다. 그리고 실험값인 변위연성도와 Eurocode 8의 요구곡률연성도와의 비교를 위하여 Priestly가 제안하였고 Eurocode 8에서 사용하고 있는 식 (2) 변위연성도와 곡률연성도 상관식을 이용하여 분석하였다.

분석 결과 Fig. 8 및 Table 4에 보이는 바와 같이 완전연성 및 한정연성 모두 축하중비 15% 이하에서는 과도한 철근비이며, 완전연성인 경우에 최소철근비 및 심부구속철근비 산정식은 각각 축하중비 20%, 30%에 적합한 기준인 것으로 나타났다.

그리고 한정연성인 경우 축하중비 20%, 30%에서는 각각 최소철근비 및 심부구속철근비 산정식의 약 70%이면 요구연성도를 만족하는 것으로 나타났다.

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) \frac{L_p}{L} (1 - 0.5 \frac{L_p}{L}) \quad (2)$$

여기서,  $L_p = 0.08L + 0.0022f_y d_b \geq 0.044f_y d_b$

#### 4.4 NZS 3101

NZS 3101에서는 곡률연성도를 기준으로 요구연성을 규정하므로, Eurocode 8과 같이 변위연성도와 곡률연성도 상관식 (2)를 적용하여 분석하였다. NZS 3101의 요구곡률연성도가 20이므로 다른 관련기준에 비교하여 요구연성도가 가장 크다. 그리고 NZS 3101의 요구심부구속철근비식도 Eurocode 8과 같이 축하중비 약 25% 이상에서만 해

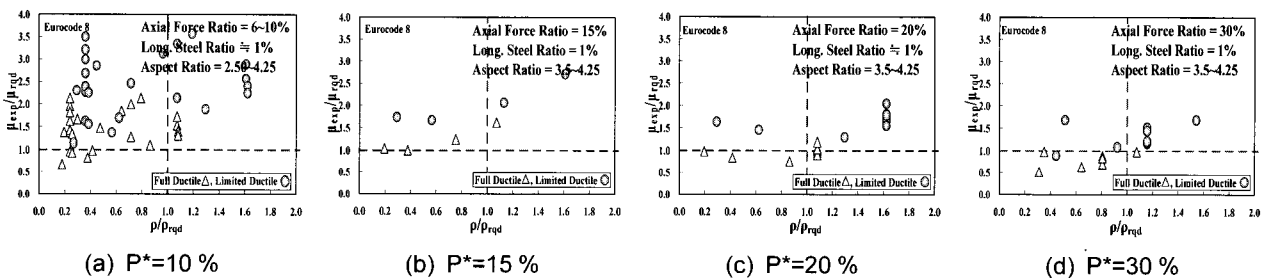


Fig. 8 Displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in Eurocode 8

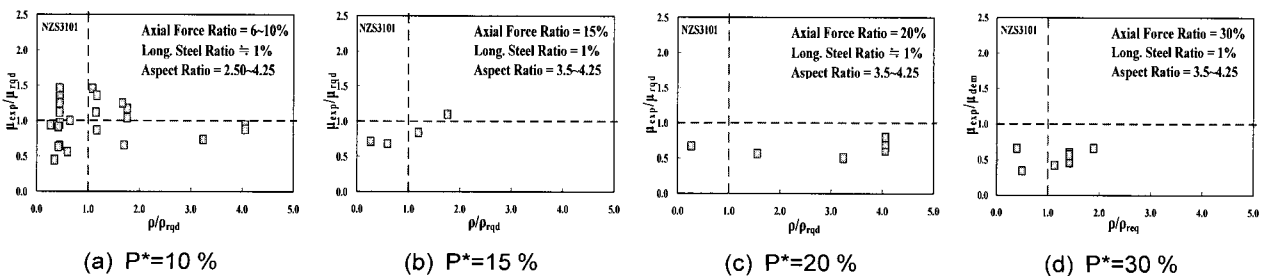


Fig. 9 Displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in NZS3101

**Table 4** Normalized confinement steel ratio required for the specified displacement ductility

Code		AFR*	10 %	15 %	20 %	30 %
		NCSR**	$\rho/\rho_{req}$	$\rho/\rho_{req}$	$\rho/\rho_{req}$	$\rho/\rho_{req}$
AASHTO			0.321	0.452	0.833	1.191
ATC-32	Full		0.754	1.066	1.296	1.549
	Limited		0.402	0.568	0.691	0.826
Eurocode 8	Full		0.346	0.439	0.931	0.983
	Limited		0.260	0.329	0.699	0.705
NZS 3101			1.339	1.099	5.460	2.672

\* AFR : Axial force ratio,

\*\* NCSR : Normalized confinement steel ratio( $\rho/\rho_{req}$ )

당되며 그 이하에서는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 최소 규정을 적용하게 된다. 따라서 축하중비가 25% 이하인 경우에는 Fig. 1과 같이 요구심부구속철근비가 약 0.5% 부근의 값을 보이게 되므로 다른 설계식보다 오히려 적은 심부구속철근비를 요구한다. 따라서 Fig. 9에 보이는 바와 같이 축하중비 증가에 따른 결과가 매우 일정하지 않은 것을 볼 수 있다. 즉 요구연성도는 매우 높으나 축하중비 25% 이하에서는 주철근 좌굴을 방지하기 위한 최소철근 규정을 적용하게 되므로 사용된 철근비에 따른 연성도비가 적게 나온 결과로 판단된다. 또한 심부구속철근비 산정식을 적용하는 축하중비 30%에도 Table 4에 나타난 바와 같이 규정보다 많은 약 2.7배의 철근비가 소요되는 것을 알 수 있다.

#### 4.5 분석 결론

Table 4에 4장의 분석에 사용된 실험체들을 대상으로 하여 각국의 요구연성도를 만족하기 위한 소요심부구속철근비를 요구철근비에 대한 비로 나타내었으며 자세한 계산과정은 연계논문<sup>28)</sup>에 수록하였다. Table 4에 보이는 바와 같이 NZS3101는 요구연성도와 요구심부구속철근비가 매우 적합하지 않은 결과를 보이고 있으며, Eurocode 8의 경우에는 축하중비 15% 이하에서는 최소철근비가 상당히 과다함을 알 수 있다. ATC-32 규정에서는 요구연성은 완전연성과 한정연성으로 구분되어 있으나 심부구속철근비 산정식은 동일한 관계로 완전연성에는 적합하지 않은 결과를 보였다. AASHTO는 축하중비를 고려하고 있지 않아 축하중비가 증가함에 따라 소요철근비가 일정 비율로 증가함을 알 수 있다. 따라서 연계논문에서 분석한 바와 같이 AASHTO 식에 축하중비의 영향을 고려하는 것이 바람직 할 것으로 판단되며, 결과를 상세히 분석하여 요구연성도를 만족하기 위한 합리적인 심부구속철근비 산정식을 제안하고자 한다.

### 5. 결 론

본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 도로교설계기준의 심부구속철근비 산정식에는 축하중비의 영향을 전혀 고려하고 있지 않으나, 축하중비는 교각의 내진성능에 지배적인 영향인자의 하나인 것으로 조사되었다. 따라서 현행 기준은 낮은 축하중비에서는 과다한 심부구속철근비를 요구하는 것으로 나타났으며, 반대로 높은 축하중비에서는 다소 적게 산정되고 있으므로, 축하중비를 심부구속철근비 산정식에 추가로 도입해야 한다.
- 2) 10% 정도의 낮은 축하중비에서는 주철근 좌굴 억제를 고려한 최소 심부구속철근비를 제시하고 그 이상의 축하중비에서는 축하중비에 비례하는 합리적인 심부구속철근비 설계기준식이 마련되어야 할 것으로 사료되며 연계 논문에 관련식을 제안하였다.

### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04핵심기술CO2-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2000, pp.451~474.
2. 정영수, 이강균, 한기훈, 이대형, "유리섬유보강 원형철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 준정적 실험연구", 콘크리트학회 논문집, 11권, 5호, 1999, pp.107~118.
3. 이재훈, 배성용, 윤석구, "나선철근교각의 내진성능 실험", 대한토목학회논문집, Vol.21, No.1-A, 2001, pp.109~121.
4. 이재훈, 고성현, 이대형, 정영수, "반복 횡하중을 받는 원형교각의 휨-전단 거동", 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp.823~831.
5. Asad Esmaily and Yan Xiao, "Behavior of Reinforcement Concrete Columns Under Variable Axial Loads", *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.1, 2004, pp.124~132.
6. Nadim I. Wehbe, M. Saiid Saiidi, and David H. Sanders, "Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.2, 2003, pp.248~259.
7. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Ed.", American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2000, pp.389~424.



8. CSA Standard A23.3-94, *Design of Concrete Structures*, Canadian Standards Association, 1994, pp.136~158.
9. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-02) and Commentary (ACI318R-02)*, American Concrete Institute, 2002, pp.303~342.
10. ATC-32, *Improved Seismic Design Criteria for California Bridge Provisional Recommendations*, Applied Technology Council, 1996, pp.8-1~8-58.
11. Caltrans, *Bridge Design Specification*, California Department of Transportation, 2004, pp.107~118.
12. Eurocode 8, *Design Provision for Earthquake Resistance of Structures, Part 2. Bridges*, European Committee for Standardization, 1996, pp.1~98.
13. New Zealand Standard, *Concrete Structures Standard : Part 1 - The Design of Concrete Structures*, NZS 3101, 1995, pp.91~106.
14. 정영수, 이재훈, 김재관 등, “고속도로 기존교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구,” 한국도로공사, 2001, pp.61~638.
15. 이재훈, 석상근, 윤석구, “원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 실험,” 대한토목학회논문집, Vol.22, No.1-A, 2002, pp.159~170.
16. 정영수, 박중협, 박희상, “원형철근콘크리트 교각의 내진성능 평가 및 향상에 관한 유사동적 실험 연구,” 대한토목학회논문집, Vol.22, No.3-A, 2002, pp.499~509.
17. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, “주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가,” 대한토목학회논문집, Vol.22, No.5-A, 2002, pp.1193~1201.
18. 정영수, 박창규, 이은희, “지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도,” 한국지진공학학회논문집, 7 권, 3호, 2003, pp.79~88.
19. 이재훈, 손혁수, 고성현, “축방향 연결상세에 따른 철근콘크리트 원형교각의 내진성능,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 2호, 2004, pp.249~260.
20. Chung Young Soo, Park Chang Kyu, and Lee Eun Hee, “Seismic performance and damage assessment of reinforced concrete bridge piers with lap-spliced longitudinal steels”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.17, No.1, 2004, pp.99~112.
21. 박창규, 정영수, 고성현, 이재훈, “주철근 겹침이음된 실물교각의 횡구속 정도에 따른 내진성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp.687~696.
22. 박진영, 정영수, 박창규 외, “철근콘크리트 교각의 주철근 이음방법에 따른 내진성능 평가”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol.14, No.2, 2002, pp.323~328.
23. 정영수, 박진영, 이지영, “FRP 나선근 RC 교각의 내진성능 평가(II)-밴드형 FRP-”, 대한토목학회 논문집, Vol.23, No.5A, 2003, pp.947~954.
24. M. J. N. Priestley and Gianmario Benzoni, “Seismic Performance of Circular Columns with Low Longitudinal Reinforcement Ratios”, *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.4, 1996, pp.1~12.
25. Asad Esmaily and Yan Xiao, “Behavior of Reinforced Concrete Columns Under Variable Axial Loads”, *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.1, 2004, pp.124~132.
26. Lawrence L. Kodd and Nigel Cooke, “Capacity of Circular Bridge Columns Subjected to Base Excitation”, *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.2, 2001, pp.297~308.
27. A. M. Budek, M. J. N. Priestley, and Chin Ok Lee, “Seismic Design of Columns with High-Strength Wire and Strand as Spiral Reinforcement”, *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.660~670.
28. 박창규, 이대형, 이범기, 정영수, “원형철근콘크리트 교각의 내진성능(II) -심부구속철근비 제안-”, 콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, 게재예정.

## 요 약

본 연구에서는 합리적인 내진설계기준의 정립을 위하여 철근콘크리트 교각의 내진성능에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 분석하였다. 주요 각국의 내진규정에서 내진성능을 발휘하기 위한 심부구속철근량을 규정함에 있어 다양한 요소들을 고려하고 있다. 하지만, 이러한 요소들이 합리적으로 고려되었는가에 대해서는 의문이 남는다. 따라서 본 연구에서 국내의 도로교설계기준, Eurocode 8 part2, NZS 3101, ATC-32 등의 설계기준을 비교분석하고, 기존 실험 연구 결과와 비교 분석하여 합리적인 영향인자들을 제안하고자 하였다. 연구결과에 따르면 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능에 가장 지배적인 영향인자는 축하중비인 것으로 조사되었다. 따라서 심부구속철근비 산정식에 축하중비의 영향을 전혀 고려하고 있지 않는 현행 도로교설계기준에 축하중비를 도입해야 한다.

**핵심용어** : 원형 철근콘크리트 교각, 내진성능평가, 내진영향인자, 축하중비, 구속철근비