

원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 II. 심부구속철근비 제안

박창규^{1)*}·이대형²⁾·이범기¹⁾·정영수¹⁾

¹⁾ 중앙대학교 토목공학과 ²⁾ 경도대학 토목과

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

Aseismic Performance Analysis of Circular RC Bridge Piers II. Suggestion for Transverse Steel Ratio

Chang-Kyu Park^{1)*}, Dae-Hyoung Lee²⁾, Beom-Gi Lee¹⁾, and Young-Soo Chung¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Ansong, 456-756, Korea

²⁾ Dept. of Civil, Gyeongdo Provincial College, Yecheon, 757-807, Koera

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

ABSTRACT

In this research, major design factors have been evaluated for the establishment of the rational seismic design code of circular RC(reinforced concrete) bridge pier. Previous experimental researches have drawn a conclusion that transverse confinement reinforcements have been excessively used for RC bridge piers in Korea. Thus, the objective of this study is to propose a rational design equation for transverse reinforcements of RC bridge piers in Korea which would be classified as a low or moderate seismic region. Newly proposed equation further considers the effect of the axial force ratio and the longitudinal steel ratio. Minimum transverse confinement steel ratio is also proposed to avoid probable buckling of the longitudinal reinforcing steels subjected to relatively low axial force. It is thought that these new codes seem to alleviate the rebar congestion in the plastic hinge region of RC bridge piers which contribute to the enhancement of constructibility and economization for RC bridge construction.

Keyword : circular RC bridge pier, confinement steel ratio, axial force ratio, longitudinal steel ratio

1. 서 론

최근 인도네시아의 해일로 인해 엄청난 피해가 일어났을 뿐만 아니라 세계적으로 강진에 의한 피해가 빈번히 발생하고 있으나 내진설계 등으로 지진에 대한 대책이 잘 수립된 지역에서는 피해가 경미한 것으로 나타났다. 일반적으로 구조물의 내진설계는 지진 발생시 취성파괴의 방지와 지진에너지를 흡수하여 인명의 손실을 방지해야하므로 연성의 확보는 매우 중요하다. 철근콘크리트 교각의 내진설계에서도 필요한 연성을 확보하기 위하여 심부구속철근량을 규정하고 있다.

국내에서도 1992년 개정된 도로교표준시방서¹⁾에 내진설계편이 신설되었고 2000년 도로교설계기준²⁾에서 내진설계기준이 일부 개정되었다. 그러나 이러한 설계기준은 미국의 AASHTO³⁾기준을 그대로 사용하여 강진에 대한 완전연성 설계 개념을 기본으로 하고 있다. 이런 연유로 현재

국내에서는 철근콘크리트 교각의 경우 과도한 심부구속철근량으로 인하여 현장 시공에 어려움을 겪고 있으며 경제적인 손실을 야기하고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 김재관 등⁴⁾은 우리나라와 같은 중저진지역에서 합리적이고 경제적인 설계를 위하여 한정연성 개념을 도입하여야 한다고 하였다. 또한, 정영수⁵⁾, 이재훈⁶⁾, 박종협⁷⁾등도 심부구속철근량에 따른 내진성능의 차이를 실험적으로 연구 발표하였으며, 비내진횡방향철근량을 갖는 교각의 경우 약 10% 정도의 낮은 축하중비에서도 만족할만한 연성능력을 가지고 있는 것으로 조사되었다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라와 같은 중·저진 지역에 적합한 원형 철근콘크리트 교각의 심부구속철근량을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 우리나라와 같이 지진의 위험도가 상대적으로 크지 않은 중·저진 지역에 설계되고 시공되는 원형 콘크리트 교각의 횡방향구속철근량을 기존 실험 연구 결과들과 비교하여 분석하였다. 이대형 등⁸⁾은 본 논문의 선행 연구로서 국내 및 국외의 실험 연구 결과를 바탕으로 심부구속철근량의 산정에 큰 영향을 미치는 인자인 축하중비, 형상비, 그리고 주철근비가 내진

* Corresponding author

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

©2005 by Korea Concrete Institute

성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였으며, 이들 영향 인자들이 연성능력에 미치는 영향을 분석하였다. 내진 영향 인자에 따른 연성도 분석 결과는 축하중비에 의한 영향이 매우 크게 작용하였으며 주철근비의 경우 높은 축하중에서는 영향이 있으나 낮은 축하중에서는 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다. 따라서 요구 변위 연성 능력은 지역적인 특성, 지진하중의 재현 주기, 위험도 등에 따라 원형 철근콘크리트 교각에 대한 적절한 기준이 마련되어야 할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 현재 우리나라 설계기준에서 요구하고 있는 단주의 응답수정계수 “3”에 대한 변위 연성 능력을 발휘하기 위한 적절한 심부구속철근비를 제안하고자 하였다.

2. 심부구속철근비 기준 평가

2.1 축하중비의 영향

각국의 내진 설계기준에서 규정하는 요구 변위연성능력에 따른 심부구속철근비는 이와 관련된 실험 결과들을 분석한 결과에 의하면 축하중비가 10~20%의 범위에서는 요구변위연성능력에 비해 과도한 심부구속철근비를 요구하고 있는 것으로 조사되었다. Fig. 1은 현행 AASHTO규정에서 요구하는 심부구속철근비(ρ_{rqd})에 대한 실험체 심부구속철근량(ρ)의 비에 대한 요구연성도(μ_{rqd})에 따라 실험 결과 연성도(μ_{exp})의 비를 나타낸 것이다. Fig. 1에

서 알 수 있는 바와 같이 주철근비가 약 1%에 축하중비가 10%로 낮은 경우 심부구속철근량이 AASHTO규정에서 요구하는 심부구속철근량에 비해 적더라도 대부분 요구연성도를 만족하는 실험 결과를 보이고 있으며 이와 반대로 축하중비가 30%인 경우에는 요구연성도에 거의 근접하는 실험 결과를 보이고 있다.

기존의 실험 결과에 기초한 합리적인 원형 철근콘크리트 교각에 대한 심부구속철근량을 산정하기 위하여 현행 요구 변위 연성 능력을 기준으로 심부구속철근비를 보정하기 위한 보정계수 γ 를 다음과 같이 조사하였다. Fig. 1을 비롯한 이대형⁸⁾의 Figs. 7~9에서 보이는 바와 같이 유사한 축하중비와 주철근비를 가진 실험체들의 다양한 심부구속철근비 및 변위연성도를 각국 기준의 요구연성도에 맞추도록 횡철근비를 보정하였다. 이때 사용한 함수는 다음의 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$(\mu_{exp}/\mu_{rqd})_i = a_i \times (\rho/\rho_{rqd})_i + 1/\mu_{rqd} \quad (1)$$

$$(\rho/\rho_{rqd})_{i,rqd} = [(\mu_{exp}/\mu_{rqd})_i - 1/\mu_{rqd}]/a_i \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\sum (\rho/\rho_{rqd})_{i,rqd}}{n} \quad (3)$$

여기서, 식 (1)은 i 번째 실험체의 실험 결과와 y 축의 절편 $1/\mu_{rqd}$ 를 지나는 직선방정식이며, a_i 는 이 직선방정식의 기울기이다. 특히 y 축 절편 “ $1/\mu_{rqd}$ ”의 “1”은 실험체의 이론적인 최소 연성도를 “1”로 가정한 것이다.

식 (2)는 i 번째 실험체의 변위연성도가 요구연성도가

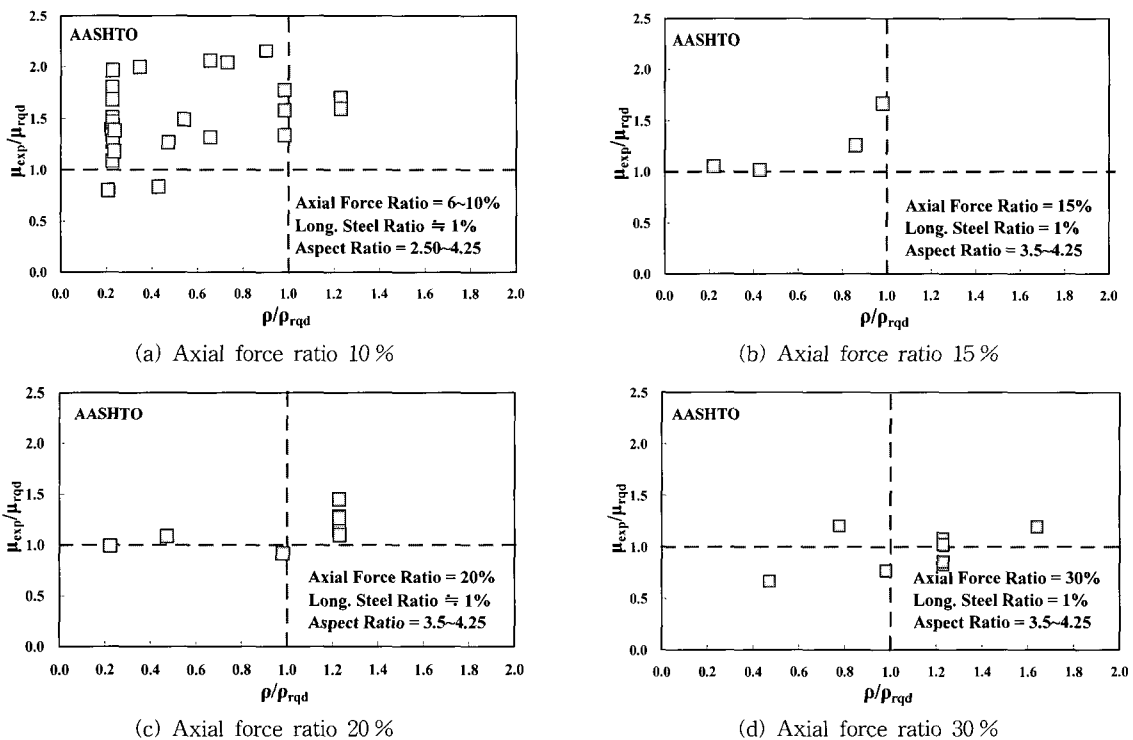


Fig. 1 Experimental displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in AASHTO

되는 식 (1)의 좌변이 1.0이 되는 소요 심부구속철근비를 산출하는 것이다. 즉, 각 기준의 요구연성도에 대한 실험 연성도의 비인 $(\mu_{exp}/\mu_{rqd})_i = 1$ 이 되는 $(\rho/\rho_{rqd})_{i,rqd}$ 를 산출하였다.

식 (3)의 보정계수 γ 는 각 실험체 $(\rho/\rho_{rqd})_{i,rqd}$ 의 합을 실험체수(n)으로 나눈 값이다. 즉 평균값이 요구연성도를 만족하기 위한 각 기준의 요구 심부구속철근비에 대한 소요 심부구속철근비이므로 이를 보정계수 γ 로 결정하였다.

Table 1 Calculated results of specimens

Specimens	AASHTO				ATC-32(limited ductile)				Eurocode 8(limited ductile)				NZS 3101				Ref.								
	ρ_{rqd} (%)	$\frac{\rho}{\rho_{rqd}}$	$\frac{\mu_{exp}}{\mu_{rqd}}$	Eq. (2)	ρ_{rqd} (%)	$\frac{\rho}{\rho_{rqd}}$	$\frac{\mu_{exp}}{\mu_{rqd}}$	Eq. (2)	ρ_{rqd} (%)	$\frac{\rho}{\rho_{rqd}}$	$\frac{\mu_{exp}}{\mu_{rqd}}$	Eq. (2)	ρ_{rqd} (%)	$\frac{\rho}{\rho_{rqd}}$	$\frac{\mu_{exp}}{\mu_{rqd}}$	Eq. (2)									
CS2P1L1	0.85	0.86	1.26	0.65	0.68	1.08	1.26	0.81	0.97	1.13	2.06	0.44	0.61	1.20	0.84	1.47	5)								
CS2P1L1		0.43	0.83	0.54	0.61	0.60	0.83	0.76		0.57	1.37	0.37		0.56	1.22										
CS2P1L1		1.02	0.42	0.68	0.54	1.02	0.53	0.68		0.56	1.67	0.28		0.68	0.95										
N-SP00-P1-R0	0.87	0.22	1.39	0.15	0.66	0.29	1.39	0.19	0.99	0.29	2.30	0.10	0.72	0.27	0.94	0.29	9)								
N-SP00-P2-R0			1.05	0.21	0.72	0.26	1.05	0.25			1.74	0.14			0.71	0.40									
N-SP00-P3-R0			0.99	0.22	0.79	0.24	0.99	0.25			1.63	0.15			0.67	0.43									
L-SP00-P1-R0			0.54	1.49	0.33	0.66	0.71	1.49			0.44	0.71			2.46	0.22		0.65	1.00	0.65					
S-SP00-P1-R0			0.90	2.16	0.37	0.66	1.18	2.16			0.48	1.19			3.57	0.25		1.08	1.45	0.71					
MS-HT3-N-I2	1.01	0.23	1.81	0.11	0.75	0.31	1.81	0.15	0.96	0.36	3.21	0.08	0.51	0.45	1.34	0.32	21)								
MS-HT4-N-I1			1.27	0.17			1.27	0.23			2.27	0.12			0.95	0.48	13)								
MS-HT4-N-I2			1.97	0.10			1.97	0.14			3.50	0.07			1.46	0.29	21)								
MS-HT4-N-I3			1.68	0.12			1.68	0.16			2.99	0.09			1.25	0.35									
MS-HT4-N-FS			1.46	0.14			1.46	0.19			2.39	0.12			0.97	0.46									
MS-HT5-N-I2			1.51	0.14			1.51	0.19			2.68	0.10			1.12	0.39	13)								
MD-HT6-N-I2			1.12	0.20			1.12	0.23			2.00	0.14			0.22	0.83	0.28								
MD-HT7-N-I2			0.46	1.21			0.37	0.88			0.53	1.21			0.42	0.73	2.16	0.26	1.03	0.46	0.90	0.52			
DN-SP00-R0			0.84	0.27			1.55	0.16			0.87	0.26			1.55	0.16	0.89	0.36	2.21	0.13	0.46	0.50	0.87	0.58	16)
DL-SP00-R0				0.76			1.97	0.34				0.74			1.97	0.33		1.01	2.82	0.28		1.39	1.11	1.24	
NS-LP1-A1	0.98	0.24	0.96	0.19	0.70	0.33	0.96	0.35	0.89	1.61	1.56	0.21	0.55	0.58	0.63	0.73	15)								
ML-LP1-A1			0.65	1.32			0.47	0.92			1.32	0.66			1.07	2.14		0.40	0.87	1.38					
S-LP1-A1			0.98	1.58			0.57	1.38			1.58	0.80			1.61	2.56		0.49	1.04	1.68					
NS-LP2-A1			0.24	1.38			0.16	0.33			1.38	0.22			0.39	2.25		0.14	0.91	0.47					
ML-LP2-A1			0.65	2.06			0.28	0.92			2.06	0.40			1.07	3.34		0.24	1.36	0.83					
S-LP2-A1			0.98	1.78			0.50	1.38			1.78	0.70			1.61	2.89		0.42	1.17	1.47					
S-LP3-A2			1.67	0.53			0.76	1.26			1.67	0.68			0.89	2.71		0.45	1.76	1.10	1.58				
2.5N-SP00-R0	0.72	0.32	1.44	0.20	0.80	0.29	1.44	0.19	0.82	0.42	2.00	0.17	0.44	0.53	0.78	0.70	*								
2.5S-SP00-R0		1.46	2.29	0.56		1.33	2.29	0.51		1.93	3.18	0.48		2.42	1.24	1.91	*								
CS-HF50-N	0.77	1.38	2.53	0.47	0.87	1.22	2.53	0.42	0.87	1.82	3.96	0.34	0.42	2.51	1.59	1.50	*								
CS-HF50-S			2.39	0.51			2.39	0.45			3.74	0.36			1.50	1.59	*								
S-SP50			1.64	0.77			1.64	0.67			2.58	0.55			1.04	2.41	1.71	1.47	17)						
S-SP100-PW			2.65	0.45			2.65	0.40			4.15	0.33			1.67	1.42	1.82	1.42	18)						
3.5N-SP00-R0	0.72	0.33	1.16	0.28	0.80	0.30	1.16	0.25	0.82	0.44	1.77	0.21	0.44	0.55	0.71	0.82	*								
3.5N-SP00-HK			1.42	0.22			1.42	0.20			2.18	0.16			0.87	0.64	*								
3.5L-SP00-p1.12			2.04	0.32			0.74	0.71			2.04	0.31			3.13	0.24	0.32	1.67	1.25	1.30	*				
3.5L-SP00-p1.55	0.73	0.73	2.12	0.30	0.80	0.66	2.12	0.28	0.82	0.96	3.25	0.23	0.44	1.21	1.30	0.90	*								
3.5L-SP00-p1.97			1.62	0.41			0.85	0.62			1.62	0.35			2.48	0.31	0.56	0.95	0.99	0.96	*				
3.5S-SP10-PW			1.46	1.90			0.69	0.80			1.33	1.90			0.62	1.93	2.91	0.51	0.44	2.42	1.16	2.04	*		
CN-SP-60-30	1.23	1.64	1.19	1.32	1.13	1.16	1.19	0.94	1.23	1.54	1.68	0.79	0.70	1.89	0.66	3.06	6)								
CN-SP-80-20			1.29	0.91	0.98	1.01	1.29	0.75	0.92	1.62	1.81	0.76	0.24	4.06	0.71	6.03									
CN-SP-80-30	0.98	1.23	1.02	1.21	1.13	0.87	1.02	0.86	1.23	1.16	1.43	0.72	0.70	1.41	0.56	2.80	14)								
CN-SP-100-10			1.34	0.69	0.82	0.96	1.34	0.68	0.92	1.29	1.89	0.58	0.24	3.24	0.74	4.59									
CN-SP-100-20			0.92	1.09	0.98	0.81	0.92	0.90	0.92	1.29	0.92	0.51	0.72	0.51	7.28										
CN-SP-100-30			0.77	1.38	0.98	0.70	0.77	0.98	0.92	1.08	0.83	1.13	0.42	3.20											
CN-C0-80-30			0.83	1.57	1.13	0.87	0.83	1.11	1.23	1.16	1.17	0.94	0.70	1.41	0.46	3.63									
CN-C1-80-30			1.08	1.12	1.08	0.79	1.08	0.79	1.16	1.52	0.67	1.41	0.60	2.60											
CN-C2-80-10			1.70	0.66	0.82	1.21	1.70	0.64	0.92	1.62	2.40	0.55	0.24	4.06	0.94	4.36									
CN-C2-80-20			1.23	0.95	0.98	1.01	1.23	0.78	1.23	1.16	1.74	0.80	0.70	1.41	0.68	6.33									
CN-C2-80-30			0.86	1.51	1.13	0.87	0.86	1.06	1.23	1.16	1.21	0.90	0.70	1.41	0.47	3.48									
CN-C3-80-10			1.59	0.71	0.82	1.21	1.59	0.69	0.92	1.62	2.24	0.59	0.24	4.06	0.88	4.71									
CN-C3-80-20	1.28	0.91	0.98	1.01	1.28	0.75	0.92	1.62	1.80	0.76	0.24	4.06	0.71	6.06											
CN-C3-80-30	1.02	1.20	1.13	0.87	1.02	0.85	1.23	1.16	1.44	0.72	0.70	1.41	0.56	2.78											
CN-C4-80-20	1.17	1.02	0.98	1.01	1.17	0.84	0.92	1.16	1.65	0.85	0.70	1.41	0.64	6.76											
CN-C5-80-20	1.10	1.09	0.98	1.01	1.10	0.90	0.92	1.55	0.92	0.78	0.24	4.06	0.61	7.29											
CN-C6-80-20	1.27	0.92	0.98	1.01	1.27	0.76	0.92	1.79	0.77	0.93	0.24	4.06	0.70	6.12											
CN-C7-80-20	1.45	0.79	0.98	1.01	1.45	0.65	0.92	2.05	0.66	1.09	0.24	4.06	0.80	5.23											
CNH-SP-60-20	1.64	1.13	1.42	1.04	1.13	0.90	0.92	2.16	1.36	1.46	0.38	3.49	0.51	7.49	6)										
CNH-SP-80-20	1.23	0.88	1.45	0.78	0.88	0.92	0.92	1.62	1.06	1.50	0.24	4.06	2.62	0.40		7.67									
CNH-SP-100-20	0.98	0.96	1.03	0.62	0.96	0.66	0.92	1.29	1.16	1.07	0.24	4.06	2.09	0.44		5.46									
CN-SP-NC-10	0.85	0.47	1.27	0.35	0.89	0.45	1.27	0.34	0.96	0.62	1.69	0.32	0.24	1.70	0.65	2.76	19)								
CN-SP-NC-20			1.09	0.43	1.06	0.38	1.09	0.34			0.26	1.56	0.56	3.05											
CN-SP-NC-30			0.66	0.81	1.23	0.32	0.66	0.56			1.29	0.44	0.89	0.52	0.80	0.50		0.34	1.86						
Column 2	0.86	0.21	0.80	0.28	0.60	0.30	0.80	0.39	0.10	0.27	1.14	0.22	0.52	0.34	0.45	0.91	22)								
No. 1	0.67	0.78	1.20	0.62	1.43	0.36	1.20	0.29	1.49	0.51	1.68	0.26	1.32	0.39	0.66	0.64	23)								
1a	3.95	0.22	1.42	0.15	0.88	1.01	1.42	0.66	1.88	0.70	1.96	0.30	0.79	1.12	0.76	1.52	24)								
1b	3.12	0.28	1.74	0.15	0.72	1.22	1.74	0.63	1.48	0.89	2.40	0.31	0.79	1.34	1.03	1.30									
2b	2.95	0.36	1.58	0.21	0.69	1.53	1.58	0.89	1.40	1.13	2.54	0.35	0.82	0.81	1.70	0.75									
3b		0.23	1.50	0.14	0.67	0.99	1.50	0.61	0.71	2.59	0.21	0.82	0.81	1.70	0.75										
HS4	0.90	0.91	1.60	0.52	1.02	0.81	1.60	0.46	0.10	1.24	2.37	0.42	0.64	1.29	0.94	1.39	25)								

* These are new test results which have not reported in any journal

Table 2 Modification factor for confinement steel ratio

Modification factor (γ_1)	Axial force ratio			
	10 %	15 %	20 %	30 %
AASHTO	0.321	0.452	0.833	1.191
ATC-32	Full	0.754	1.066	1.296
	Limited	0.402	0.568	0.691
EC 8	Full	0.346	0.439	0.931
	Limited	0.260	0.329	0.699
NZS 3101	1.339	1.099	5.4604	2.672

각 기준에 대한 실험체들 각각의 계산 결과를 Table 1에 나타내었으며, Table 2에 이들의 1차 보정계수 γ_1 을 나타내었다. Table 2에서 나타난 바와 같이 AASHTO 및 ATC-32의 경우 축하중비가 증가할수록 1차 보정계수 γ_1 이 증가하는 것을 알 수 있으며 높은 축하중비에서 현행 AASHTO 기준이 잘 부합하는 것으로 조사되었다. Eurocode 8과 NZS 3101의 경우에는 선행 연구에서 분석한 바와 같이 축하중비 25% 이하에서는 최소 규정이 지배적이므로 다소 불규칙한 결과를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 축하중비 영향에 따른 각 심부구속철근 산정식의 보정계수 γ_1 를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 각 기준에 따른 γ_1 값을 회귀분석한 결과 축하중비가 고려되어 있지 않은 AASHTO식의 근접도를 나타내는 결정계수(Product moment correlation coefficient)가 97%로 가장 높게 나타났다. 이는 축하중비의 영향은 선형으로 고려될 수 있음을 의미하며 또한 축하중비를 고려하고 있는 다른 식들은 어느 축하중비에서도 1차 보정계수 γ_1 이 "1.0"에 유사한 값을 보여야 하나 축하중비가 증가함에 따라 보정계수가 변화되는 것은 그의 영향을 정확히 반영하지 못하기 때문이라고 판단된다.

주철근비가 1% 정도인 경우에 Fig. 2의 AASHTO식을 회귀분석한 결과 축하중비 0.256에서 보정계수가 "1.0"을 얻을 수 있었다. 이는 기존 AASHTO 식이 축하중비가 0.256일 때 응답수정계수 "3"에 따른 요구변위연성도 "5"를 만족한다는 것을 의미한다. 따라서 Fig. 2와 같이 축하중비가 0.256일때 AASHTO 심부구속철근비 규정인 식 (4)에 따른 심부 구속철근비와 동일한 값이 되도록 하여 축하중비를 변수로 추가한 즉 $0.45/0.256=1.76$ 의 계수를 갖는 심부 구속철근비 ρ_{s1} 을 식 (5)와 같은 형식으로 검토하였다.

$$\rho_{s, AASHTO} = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (4)$$

$$\rho_{s1} = 1.76 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{P}{f_{ck} A_g} \quad (5)$$

식 (5)는 각 축하중비에 따른 결과를 회귀분석하여 얻은 결과로서 축하중을 고려한 심부구속철근비이다. 따라서 주철근비가 1% 정도인 Fig. 1의 모든 실험 결과를 이용하

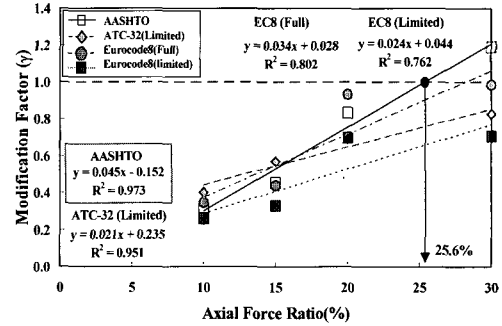


Fig. 2 Reduction factor in terms of axial force ratio

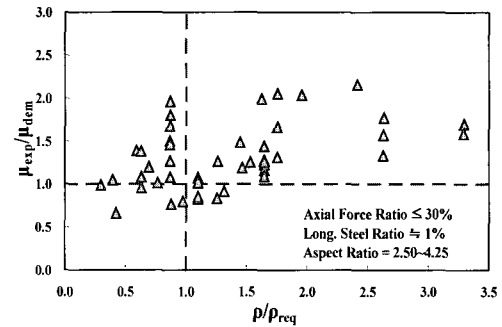


Fig. 3 Experimental displacement ductility analysis in terms of equation (6)

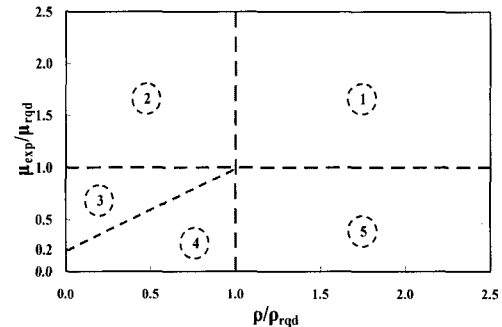


Fig. 4 Schematic diagram for safety factor

여 다시 식 (1), (2), (3)을 적용하여 검토해 보았다. 검토 결과 2차 보정계수 γ_2 는 0.952로 산출되었으며, 이에 식 (5)를 다시 보정하여 $1.76 \times 0.952 = 1.68$ 의 계수를 갖는 ρ_{s2} 에 관한 식 (6)을 도출하였다.

$$\rho_{s2} = 1.68 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{P}{f_{ck} A_g} \quad (6)$$

- 여기서, ρ_{s2} : 주철근비가 1%일 때 심부구속철근비
- A_g : 교각의 전단면적
- A_c : 교각의 심부콘크리트단면적 (띠철근 외단에서 외단까지의 면적)
- f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도
- f_y : 심부구속철근의 항복강도, P : 축방향력

식 (6)에 대한 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 1

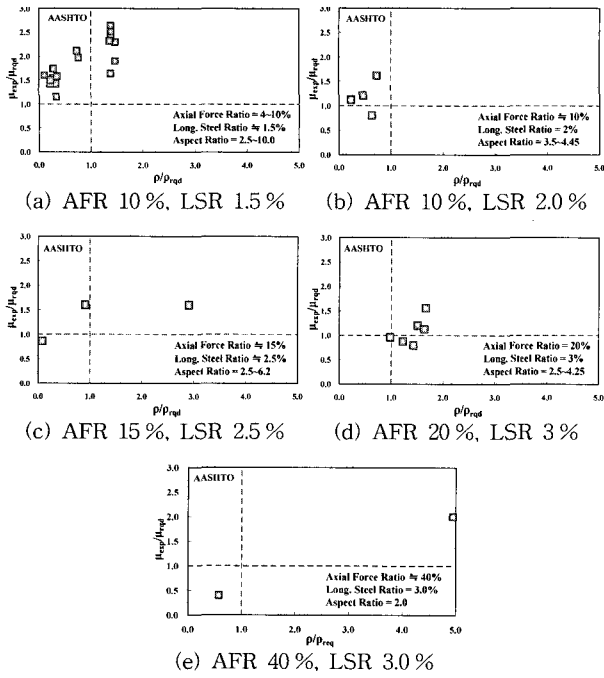


Fig. 5 Experimental displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in Eq.(4)[AFR(Axial force ratio), LSR(Longitudinal steel ratio)]

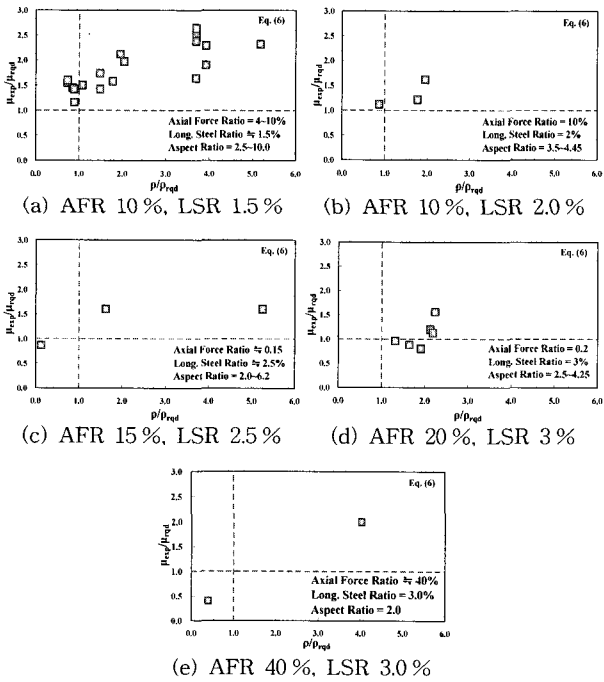


Fig. 6 Experimental displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in Eq.(6)

과 Fig. 3을 비교해 보면 실험 결과들이 2사분면에서 1사분면으로 많이 이동되었으며, 그 분포 또한 일정하다는 것을 알 수 있다. 즉 Fig. 4의 ② 영역에 실험 결과가 모이면 이는 심부구속철근량이 과다하다는 것을 의미하고, ⑤ 영역에 실험 결과가 모이면 반대로 심부구속철근량이 부

Table 3 Modification factor for confinement steel ratio

Axial force ratio	Longitudinal steel ratio				
	1.0 %	1.5 %	2.0 %	2.5 %	3.0 %
γ_4 of Eq. (4)	0.10	0.321	0.343	0.453	
	0.15	0.452			0.759
	0.20	0.833			1.332
	0.40				2.251
γ_5 of Eq. (6)	0.10		1.060	1.085	
	0.15	0.998			1.361
	0.20				1.798
	0.40				1.686

족하다는 것을 의미하며, 영역 ① 및 ③에 실험 결과가 직선적으로 분포되는 것이 가장 바람직하다. 그리고 실험체의 심부구속철근량이 식 (6)에 의해 계산된 양보다 적을 경우에 영역 ③과 ④에 분포되는데, 심부구속철근비와 변위연성도는 선형으로 비례한다는 가정 하에 영역 ③에 분포된 실험 결과는 요구연성도에 만족하고, 영역 ④에 분포된 실험결과는 요구연성도를 만족하지 못하는 것을 의미한다. 또한 식(6)에 대하여 식 (1),(2),(3)을 적용한 3차 보정계수 γ_3 는 0.998로 산출되었다. 그러므로 식 (6)은 실험 결과에 따른 축하중비의 영향을 잘 고려한 심부구속철근비 산정 식이라고 판단된다.

2.2 주철근비 영향

2.1절에서는 주철근비가 1%일 경우에 축하중비의 영향을 고려하여 새로운 심부구속철근비 식을 제시하였다. 그러나 이대형⁸⁾의 3.3절에서 분석한 바와 같이 축하중비가 10% 정도로 작을 경우에는 주철근비의 영향이 크지 않았지만 축하중비가 클 경우에는 주철근비의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 보인다. 이에 따라 축하중비와 주철근비에 따른 변위연성도의 영향을 분석하였다.

Fig. 5는 식 (4)를 이용하여 여러가지 축하중비와 주철근비를 갖는 실험체들의 결과를, Fig. 6은 식 (6)을 이용한 결과를 보인 것이며, 이들의 실험 결과를 식 (1)~(3)을 이용하여 정량적으로 분석한 각각의 4차 및 5차 보정계수 γ_4 와 γ_5 를 Table 3 및 Figs. 7과 8에 각각 나타내었다. Table 3 및 Figs. 7과 8에서 보이는 바와 같이 식 (4) 및 식 (6)에서 10%의 낮은 축하중비에서는 주철근비가 증가하여도 보정계수의 변화가 작으나, 축하중비가 증가할수록 주철근비의 증가에 따른 보정계수의 변화가 매우 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (6)을 이용하였을 때, 주철근비가 증가함에 따라 5차 보정계수가 1.0을 넘어서므로 식 (6)에 주철근비를 변수로 추가하고자 한다. 축하중비가 증가할수록 주철근비의 증가에 따른 보정계수의 증가가 크므로 주철근비 변수를 추가한 식 (7)과 같은 형식으로 제시하고자 한다.

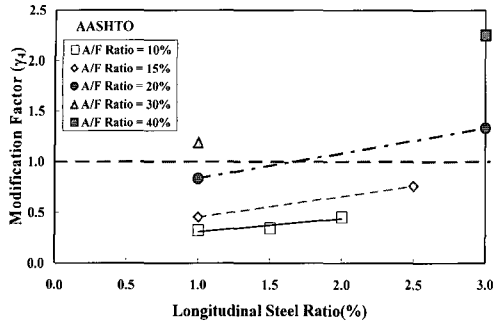


Fig. 7 Modification factor in terms of longitudinal steel ratio and axial force ratio in Eq. (4)

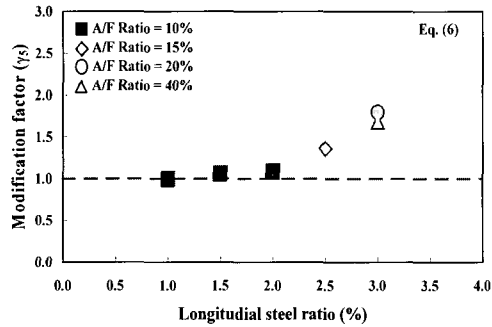


Fig. 8 Modification factor in terms of longitudinal steel ratio and axial force ratio in Eq. (6)

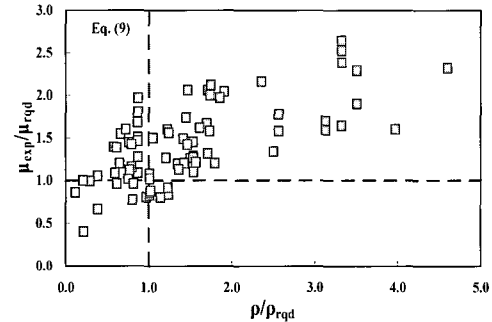


Fig. 9 Experimental displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in Eq. (9)

$$\rho_{s3} = 1.68 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + \alpha (\rho_\ell - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^\beta \quad (7)$$

식 (7)의 우변 항에 추가된 주철근비에 따른 심부구속철근비는 다음 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta \rho_s = (\gamma - 1) \rho_{s2} = \alpha (\rho_\ell - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^\beta \quad (8)$$

식 (8)의 주철근비 증가에 따른 추가의 심부구속철근비 ($\Delta \rho_s$)는 Table 3에 보인 식 (6)을 이용한 γ_s 에서 식 (6)의 ρ_{s2} 를 뺀 값이 된다. 이때 축하중비가 증가함에 따른 주철근비가 심부구속철근비에 미치는 영향이 커짐으로 축

Table 4 $\Delta \rho_s$ and α according to increase of longitudinal steel ratio and axial force ratio

Axial force ratio	Longitudinal steel ratio					
	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%	
$\Delta \rho_s$	10%	-	0.00022	0.00023	-	-
	15%	-	-	-	0.00273	-
	20%	-	-	-	-	0.00462
	40%	-	-	-	-	0.00717
$\beta=0$	10%	-	0.044	0.023	-	-
	15%	-	-	-	0.182	-
	20%	-	-	-	-	0.231
	40%	-	-	-	-	0.359
$\beta=1$	10%	-	0.44	0.23	-	-
	15%	-	-	-	1.21	-
	20%	-	-	-	-	1.16
	40%	-	-	-	-	0.90
α $\beta=1.5$	10%	-	1.39	0.73	-	-
	15%	-	-	-	3.13	-
	20%	-	-	-	-	2.58
	40%	-	-	-	-	1.42
$\beta=2$	10%	-	4.40	2.30	-	-
	15%	-	-	-	8.09	-
	20%	-	-	-	-	5.78
	40%	-	-	-	-	2.24
$\beta=3$	10%	-	44.0	23.0	-	-
	15%	-	-	-	53.9	-
	20%	-	-	-	-	28.9
	40%	-	-	-	-	5.6

하중비를 추가로 고려하였다. Fig. 6의 실험 결과를 이용하여 $\Delta \rho_s$ 를 구하면 다음 Table 4와 같으며, 여기서 공란은 해당되는 실험체수가 매우 부족하여 분석에서 제외하였다.

$$\rho_{s3} = 1.68 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 1.85 (\rho_\ell - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (9)$$

여기서, α 와 β 는 β 를 가정한 후 α 를 산출하였으며, Table 4에 보이는 바와 같이 $\beta = 1.5$ 일 때 α 값의 변동계수가 50.3%로 줄어들어, $\beta = 1.5$ 이 가장 적합한 것으로 판단된다. 따라서 이때 α 의 평균값이 1.85가 산출되어 식 (7)을 식 (9)와 같이 표현하였다. 그리고 식 (9)를 이용한 모든 실험결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 그 분포가 1사분면과 3사분면에 일정한 분포를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

식 (9)는 실험체들의 변위연성도 평균값을 기초로 유도된 심부구속철근비 산정식이므로 안전성이 확보되어야 한다. 따라서 Fig. 9에 나타난 실험결과에 대하여 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근비 비율의 분포를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용된 모든 실험체들에 대한 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근비 비율은 식 (9)의 96.1%에 표준편차는 0.424이고 변동계수는 44.2%로 나타났다.

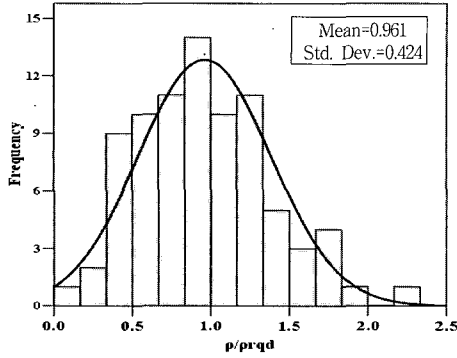


Fig. 10 Histogram and normal distribution curve on Fig. 9

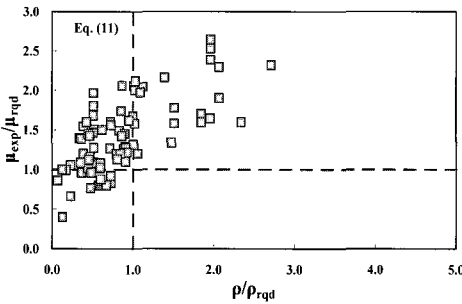


Fig. 11 Experimental displacement ductility analysis in terms of normalized confinement steel ratio in Eq. (11)

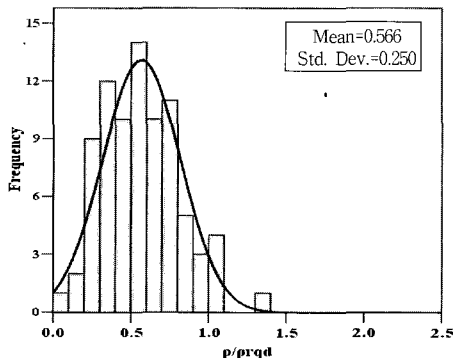


Fig. 12 Histogram and normal distribution curve on Fig. 11

이 결과를 이용하여 요구연성도를 만족할 확률이 95% 이상이 되도록 다음과 같이 정리하였다.

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{rqd}}\right)_{95\%} = \left(\frac{\rho}{\rho_{rqd}}\right)_{mean} + ks \quad (10)$$

$$1.697 = 1.0 + 1.645 \times 0.424$$

여기서, s = 표준편차, k = 1.645

식 (10)에서 평균값은 0.961이 아닌 1.0을 사용한 이유는 다음과 같다. 2.1절을 보면 주철근비가 1%일 경우의 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근비 비율의 평균값은

약 1.0으로 나타난 반면 Fig. 10의 평균값은 0.961로 나타났다. 평균값이 낮아진 이유는 식 (9)의 2항의 계수를 결정할 때 β 를 가정하고 α 의 변동계수가 가장 적을 때의 값을 사용함으로써 발생된 결과이다. 따라서 식 (10)에 평균값 0.961을 사용한다면 주철근비가 1%일 경우의 심부구속철근비는 요구연성도를 만족하기 위한 확률 95%를 확보하지 못할 것이므로, 보다 안전측의 심부구속철근비 산출을 위하여 평균값을 1.0을 사용하였다. 식 (10)의 결과를 이용하여 요구연성도를 만족할 확률이 95% 이상이 되기 위한 심부구속철근비는 식 (11)과 같이 식 (9)의 약 1.7배에 해당한다.

$$\rho_{s4} = 2.85 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 3.14(\rho_\ell - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g}\right)^{1.5} \quad (11)$$

식 (11)에 대한 실험 결과를 Fig. 11에 나타낸바와 같이 Fig. 9에 비하여 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 이들의 결과에 대한 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근비 비율의 분포를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 대한 평균값(0.566)과 표준편차(0.250)를 이용하여 이들에 대한 신뢰도를 역으로 계산한 결과 96%에 근접하는 결과(k=1.736)를 나타내었다. 따라서 식 (11) 2 항의 계수 3.14를 식 (12)와 같이 3.1로 조정하였으며 식 (12)에 대한 신뢰도는 95%를 상회하는 결과(k=1.725)를 나타내었다.

$$\rho_{s5} = 2.85 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 3.1(\rho_\ell - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g}\right)^{1.5} \quad (12)$$

3. 주철근 좌굴 방지를 위한 심부구속철근비

이대형⁸⁾은 축하중비 10% 이하의 낮은 축하중 하에서는 각국의 내진규정에서 요구되는 양보다 적은 심부구속철근량으로 충분한 연성능력을 발휘하는 것으로 조사되었다. 지진이 일어났을 때 교각은 주로 피복콘크리트가 탈락되고 또한 주철근이 좌굴되면서 파괴에 이르게 된다. 따라서, 주철근의 좌굴을 방지하기 위한 최소한의 구속철근이 요구된다. ATC-32¹⁰⁾나 NZS 3101¹¹⁾에서는 식 (13)~(15)와 같이 주철근 좌굴 방지를 위한 최소 횡철근비를 규정하고 있다. ATC-32에서는 식 (13)을 적용하고 있으며, 특히 NZS 3101에서는 지진에 의한 영향이 없는 구간에서는 식 (14)를 영향이 있는 구간에서는 식 (15)를 적용하고 있다.

$$\rho_s = 0.0002n_b \quad (13)$$

$$\rho_s = \frac{A_{st}}{155d''} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b} \quad (14)$$

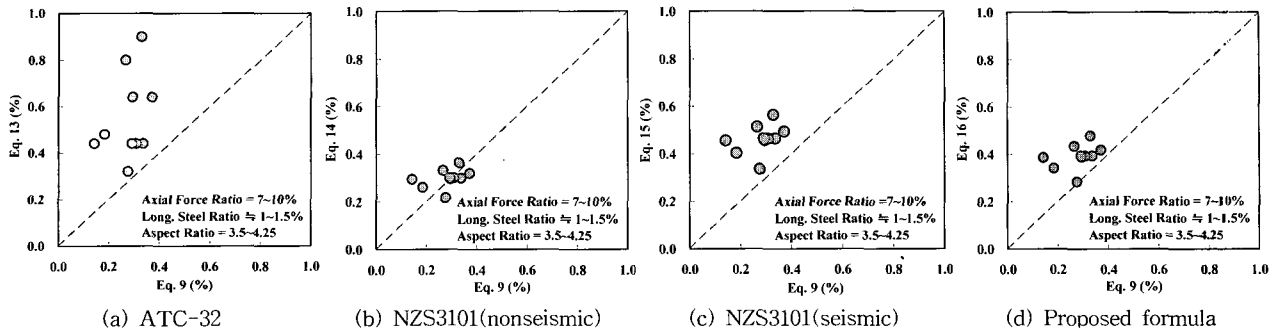


Fig. 13 Min. confinement steel ratio to prevent buckling of longitudinal steels

$$\rho_s = \frac{A_{st}}{110d''} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b} \quad (15)$$

본 연구에서는 교각에 대한 내진성능 평가를 위한 준정적실험(Quasi-static test)에서 소성힌지구간에서 발생하는 주철근 좌굴의 시점을 조사하였다. 실험에서 주철근 좌굴 여부는 피복이 완전히 떨어져 육안으로 관찰하기 전에는 그 시점을 정확히는 알 수 없다. 따라서 좌굴의 정확한 시점이 기록되지 않은 경우에는 콘크리트 피복이 탈락하는 시점을 주철근 좌굴이 시작되는 점으로 간주하였다.

실험 결과^{5-9,12-18)}를 고려해 보면 콘크리트 피복탈락 시점은 drift level 3.0~4.0% ($\mu_{\Delta} = 4.5 \sim 6.0$)로 조사되었으며, 횡구속철근비에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그리고 주철근 좌굴을 기록한 실험 연구⁶⁾ 결과에 따르면 $6\Delta_y \sim 7\Delta_y$ ($\rho_s = 0.84 \sim 1.05\%$)에서 발생한 것으로 나타났다. 그리고 대부분의 비내진 실험체의 경우, 횡구속철근비가 0.2~0.3%이고 이들의 연성도가 약 4~6의 값을 나타내며, 내진설계된 실험체의 경우 횡구속철근비가 0.9~1.0%이고 변위연성도는 8~12 정도의 결과를 보이고 있다. 즉 심부구속철근비가 적은 비내진 실험체들의 변위연성도와 주철근 좌굴시점의 변위연성도가 거의 일치함을 알 수 있다.

따라서 심부구속철근비가 적을 경우 내진성능은 주철근 좌굴에 의해서 결정된다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때, 횡구속철근비가 적을 경우에는 주철근 좌굴도 콘크리트 피복탈락의 한 원인이지만 횡구속철근비가 많을 경우에는 주철근 좌굴보다는 콘크리트의 압축파괴에 의한 영향이 더 지배적이기 때문이라 판단된다. 그리고 횡구속철근비가 적을 경우에는 피복탈락 즉 주철근 좌굴과 함께 구조물의 연성능력 또한 급격히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 주철근 좌굴을 방지하기 위해서는 횡구속철근비가 0.3% 이하가 되어서는 안되는 것으로 판단된다. 또한 이대형⁸⁾의 Fig. 3 (a) 축하중비가 10%인 경우 심부구속철근량이 0.4% 이상이면 도로교설계기준에서 요구하는 변위연성도 $\mu = 5$ 이상의 연성능력을 보이고 있으므로 최소심부구속철근비는 약 0.4% 이어야 한다고 판단된다.

NZS 3101와 ATC-32에서 규정하고 있는 주철근 좌굴

방지를 위한 횡구속철근비 산정식인 식 (13)~(15)와 본 논문에서 제시하는 심부구속철근비 식 (9)와의 심부구속철근비의 양을 비교하여 주철근 좌굴 방지를 위한 심부구속철근비 산정식의 최소 규정을 제시하고자 한다. 여기서 가정한 조건은 주철근비가 2% 이상에서는 2열로 배근이 되므로 1열 배근이 가능한 주철근비 1%~1.5%에 축하중비는 낮은 10% 이하 범위로 하였으며, 본 논문에서 분석한 실험체들의 상세와 동일하게 하였다.

분석 결과 Fig. 13에 보이는 바와 같이 축하중비가 10%인 경우에 본 논문에서 제시하는 식 (9)에 따라 산출된 심부구속철근비는 $\rho_{s3} = 0.2 \sim 0.4\%$ 의 값을 보이고 있다. 따라서 전술한 바와 같이 이러한 범위의 심부구속철근비를 갖을 경우, 주철근 좌굴에 의한 내진성능 저하가 우려되므로 주철근 좌굴 방지를 위한 최소철근비 규정을 도입하여 안전을 도모할 필요가 있다. Fig. 13(a)에 보인 ATC-32의 식은 주철근 수에 의해 결정되는 식으로서 주철근비보다는 주철근수에 의해 분포가 흩어져 나타나고 있음을 보이고 있다. 따라서 주철근수가 많은 경우에는 현행 도로교설계기준의 심부구속철근비와 유사한 $\rho_s = 0.8 \sim 1.0\%$ 로 많은 철근비를 요구하는 것으로 나타났다. 그리고 NZS 3101의 지진에 대하여 영향을 받지 않는 경우의 주철근 좌굴을 방지하기 위한 규정인 Fig. 13(b)에 보이는 바와 같이 식 (14)의 분포 결과가 본 논문에서 제시한 식 (9)와 매우 유사한 철근비 분포인 $\rho_s = 0.2 \sim 0.4\%$ 에 평균 0.29%를 보이는 것으로 나타나 이 또한 약 0.3%가 되어 주철근 좌굴에 의한 내진성능 저하가 우려된다. 그리고 Fig. 13(c)는 지진에 대하여 영향을 받는 경우의 주철근 좌굴을 방지하기 위한 규정이며 본 논문에서 수정하여 제시하는 철근비보다 약 1.5배 많은 $\rho_s = 0.4 \sim 0.6\%$ 에 평균 0.46%의 값을 나타내었다. 따라서 최소철근비가 0.4% 정도가 되기 위하여 식 (15)의 계수를 수정하여 식 (16)과 같이 제안하는 바이며 식 (16)에 대한 분석 결과는 Fig. 13(d)에 나타난 바와 같이 $\rho_s = 0.3 \sim 0.5\%$ 에 평균 0.39%의 값을 보이고 있다.

$$\rho_s = \frac{A_{st}}{130d''} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b} \quad (16)$$

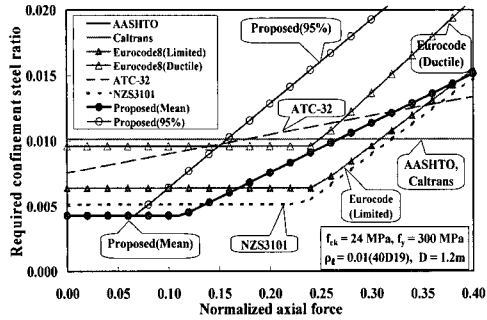


Fig. 14 Proposed equation for confinement steel ratio

4. 원형 철근콘크리트 교각의 심부구속철근비식 제안

이상의 원형교각에 대한 내진성능 평가 실험 결과로부터, 주철근 겹침이음이 없는 경우의 심부구속철근비를 다음 식 (17)과 같이 제안하였다. 본 식은 우리나라의 설계기준에 규정되어 있는 기존 AASHTO기준에 각 변수에 따른 교각의 연성능력 영향을 분석하여 축하중비와 주철근비를 추가하였으며 또한 10% 이하의 낮은 축하중비 하에서의 주철근 좌굴을 방지하기 위한 최소 규정을 도입하였다. 그리고 식 (17)은 교각의 단면이 커질 경우에는 A_g/A_c 가 1에 근접한 값을 나타내게 되어 심부구속철근비 값이 적게 산출된다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 NZS 3101의 $A_g/A_c \geq 1.2$ 규정을 도입하여 A_g/A_c 의 최소값을 1.2로 설정하였다.

$$\rho_s = \text{Max} \left[\begin{array}{l} 2.85 \frac{f_{ck} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g}}{f_{yh}} + 3.1 (\rho_l - 0.01) \left(\frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5}, \\ \frac{A_{st}}{130d''} \frac{f_y}{f_{yh}} \frac{1}{d_b} \end{array} \right] \quad (17)$$

여기서, $A_g/A_c \geq 1.2$

A_{st} : 주철근의 총단면적

d_b : 주철근의 직경

f_y : 주철근의 항복강도

Fig. 14는 제안된 식 (9)와 (17)을 기존의 다른 설계식들과 비교한 것으로서 콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$, 주철근 항복강도 $f_y = 300 \text{ MPa}$, 주철근비 $\rho_l = 0.01(40D19)$ 인 원형단면의 교각(직경 $D = 1,200 \text{ mm}$, $D' = 1,060 \text{ mm}$) 인 경우이다. 제안한 식 (17)은 축하중비 약 6%까지는 주철근 좌굴 방지를 위한 식에 지배되어 여러 설계기준 중 가장 낮은 심부구속철근비를 갖게 되며 그 이후의 축하중비에는 점점 증가하게 된다.

따라서 축하중비 16% 이하에서는 현행 도로교설계기준

의 심부구속철근비보다 적은 심부구속철근비를 사용하게 된다. 또한 주철근 좌굴 방지를 위해 제안된 최소심부구속철근비는 약 0.43%로서 현행 규정의 약 42.6%에 해당하는 매우 완화된 양이다.

6. 결론

본 연구 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 현행 도로교설계기준에서 규정하고 있는 심부구속철근비 산정식은 축하중의 영향을 전혀 고려하고 있지 않다. 따라서 낮은 축하중비에서는 매우 과다한 심부구속철근비를 요구하고 있으므로, 축하중비와 주철근비를 고려하여 기존식을 변형한 심부구속 철근비 산정식을 제안하였다.
- 2) 제안된 식은 낮은 축하중비에서는 요구철근비가 매우 적으므로 지진발생시 주철근 좌굴의 위험이 있어 주철근 좌굴 방지를 위한 최소규정을 제안하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

1. 건설교통부, "도로교표준시방서", 건설교통부, 1992, pp. 1281~1355.
2. 한국도로교통협회, "도로교설계기준", 건설교통부, 2000, pp. 451~474.
3. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Ed.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2000, pp. 389~424.
4. 김재관, 김익현, "한정연성도 설계를 위한 내진상세의 제안", 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), 2000, pp.305~308.
5. 정영수, 이강근, 한기훈, 이대형, "유리섬유보강 원형철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 준정적 실험연구", 콘크리트학회 논문집, 11권, 5호, 1999, pp.107~118.
6. 이재훈, 배성용, 윤석구, "나선철근교각의 내진성능 실험", 대한토목학회논문집, Vol.21, No.1-A, 2001, pp.109~121.
7. 박중협, "유사동적실험에 의한 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 중앙대학교 박사학위논문, 2001, pp. 42~133.

8. 이대형, 박창규, 김현준, 정영수, “원형 철근콘크리트 교각의 내진성능(I)심부구속철근비 영향변수 평가”, 콘크리트학회 논문집, 17권, 4호, 2005, pp.603~611.
9. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, “주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가”, 대한토목학회논문집, Vol.22, No.5-A, 2002, pp.1193~1201.
10. ATC-32, “Improved Seismic Design Criteria for California Bridge Provisional Recommendations”, Applied Technology Council, 1996, pp. 8-1~8-58.
11. New Zealand Standard, “Concrete Structures Standard: Part 1-The Design of Concrete Structures”, NZS 3101, 1995, pp.91~106
12. 이재훈, 고성현, 이대형, 정영수, “반복 횡하중을 받는 원형교각의 휨-전단 거동”, 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp.823~831.
13. 정영수, 이재훈, 김재관 등, “고속도로 기존교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구”, 한국도로공사, 2001, pp.61~638.
14. 이재훈, 석상근, 윤석구, “원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, Vol.22, No.1-A, 2002, pp.159~170.
15. 정영수, 박종협, 박희상, “원형띠철근콘크리트 교각의 내진성능 평가 및 향상에 관한 유사동적 실험 연구”, 대한토목학회논문집, Vol.22, No.3-A, 2002, pp.499~509.
16. 정영수, 박창규, 이은희, “지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도”, 한국지진공학회논문집, 7권, 3호, 2003, pp.79~88.
17. 정영수, 박진영, 이지영, “FRP 나선근 RC 교각의 내진성능 평가(II)밴드형 FRP”, 대한토목학회논문집, Vol.23, No.5A, 2003, pp.947~954.
18. 박진영, 정영수, 박창규 외 “철근콘크리트 교각의 주철근 이음방법에 따른 내진성능 평가”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol.14, No.2, 2002, pp.323~328.
19. 이재훈, 손혁수, 고성현, “축방향철근 연결상세에 따른 철근콘크리트 원형교각의 내진성능”, 콘크리트학회 논문집, Vol.16, No.2, 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. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.

요 약

본 연구에서는 합리적인 내진설계기준의 정립을 위하여 철근콘크리트 교각의 내진성능에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 분석하였다. 기존 연구 결과에 따르면 한반도와 같은 중약진 지역에서의 철근콘크리트 교각의 심부구속철근비가 과다하게 사용되어 왔다는 결론을 내렸다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 실험 결과들을 분석하여 합리적인 심부구속철근비를 제안하였다. 본 연구에서 제안된 심부구속철근비는 축하중비와 주철근비를 고려하였으며 낮은 축하중비에서 주철근 좌굴 방지를 위한 최소 규정을 도입하였다. 제안된 식은 일반적인 도로교상의 축하중비를 고려하면 기존 내진규정에 비해 매우 완화된 심부구속철근비를 갖게 된다. 따라서 문제로 나타나고 있는 시공성과 경제성이 상당히 향상될 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 원형 철근콘크리트 교각, 심부구속철근비, 축하중비, 주철근비