

철근콘크리트 교각의 연성요구량에 따른 심부구속철근량 Confinement Steel based on Ductility Demand for RC Bridge Columns

손혁수* 한상엽** 조재원** 이재훈***
Son, Hyeok Soo Han, Sang Yeup Jo, Jae Won Lee, Jae Hoon

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a reasonable design for transverse confinement reinforcement considering ductility and required transverse confinement reinforcement of RC bridge columns. In order to develop relationships between the curvature ductility and the displacement ductility, the analysis for total 21,600 columns using the computer program NARCC have been carried out for parametric studies. Based on the results from the parametric studies, a correlation equation between the curvature ductility and the displacement ductility was developed. In addition, an equation for calculating the required transverse confinement reinforcement based on ductility demand was developed for seismic design of RC bridge columns. The equations proposed by this study will provide more reasonable and more effective design guidelines for performance-based seismic design of RC bridge columns.

1. 서론

철근콘크리트 교각의 내진설계는 교각의 소성힌지 영역에 심부구속철근을 적절하게 배근하여 과도한 지진력을 받을 경우 구조물이 큰 변형을 일으키며 붕괴되지 않고 구조물의 비선형 거동을 통한 에너지 소산능력 즉, 충분한 연성능력을 확보함으로써 설계지진력에 저항하도록 하는 것이라 할 수 있다. 국내의 경우, 1992년 개정된 도로교표준시방서에 내진설계편이 신설됨에 따라 교량에 대한 내진설계가 처음으로 도입되었으며 1996년과 2000년 두 차례에 걸쳐 개정이 되었지만, 근본적으로는 강진에 대한 미국 AASHTO의 시방규준을 반영한 설계지침이라고 할 수 있다. 즉, 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량에 관한 시방규정은 강진지역의 설계기준을 모방한 것으로서 중·약진 지역에 속하는 국내에 그대로 적용하는 경우 과도하게 배근되는 심부구속철근으로 인한 시공상의 문제 등 실무에서 상당한 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 특히, 철근콘크리트 교각의 연성은 다양한 변수들에 의해 복합적으로 영향을 미치지만 현행 도로교설계기준(2000)의 심부

*영남대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

**영남대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수

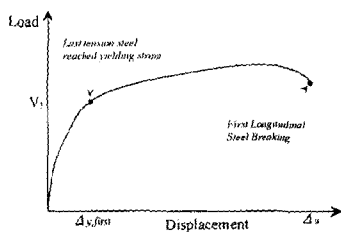
구속철근량 산정식은 일부 특정변수(재료강도 및 단면적비율)만을 고려한 식의 형태로 구성되어 있어 우리나라와 같은 중·약진 지역의 경우 보다 합리적인 심부구속철근량 산정식의 필요성이 절실히 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 이루어진 실험적 연구결과를 바탕으로 한 해석적 연구를 수행하여 철근콘크리트 교각의 연성도 상관관계를 규명하고, 소요연성도를 고려한 합리적인 철근콘크리트 교각의 심부구속철근량 산정식을 제안하고자 한다.

2. 곡률연성과 변위연성의 상관관계

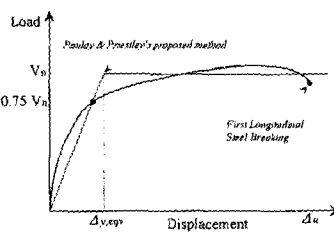
철근콘크리트 교각의 연성능력은 대표적으로 단면의 곡률연성도(curvature ductility)와 부재의 변위연성도(displacement ductility)로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 연성도를 고려한 합리적인 심부구속철근량을 제안하기 위한 선행연구로서 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 규명하기 위해 표 1에 나타낸 것과 같은 다양한 변수들의 조합에 대한 해석적연구를 수행하였으며, 해석에 사용된 프로그램은 국내·외에서 수행된 철근콘크리트 기둥의 내진성능 실험결과를 바탕으로 개발된 비선형해석 프로그램 [NARCC]^[2]를 사용하였다. 연성도 산정을 위한 항복상태의 정의는 그림 1과 같은 3가지 기준을 적용하였으며, 극한상태의 정의는 안전축인 분석 및 일관성 있는 경향분석을 위해 극한상태의 기준을 콘크리트 변형률이 극한변형률에 도달한 상태를 극한상태로 정의하여 분석을 수행하였으며 콘크리트 극한변형률은 Mander 등이 제안한 다음의 식(1)을 사용하였다.

표 1 변수연구(parametric study)에 사용된 주요변수

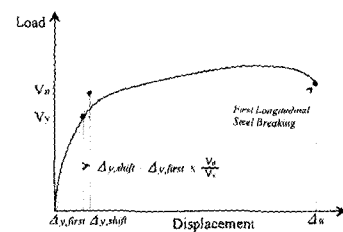
변수명	변수조건	비고
단면형상	원형단면	나선철근
단면직경, D [cm]	100, 200	-
형상비, L/D	2, 3, 4, 5, 6, 10	-
항복상태 정의	A, B, C	그림 1 참조
콘크리트 강도, f_{ck} [kgf/cm ²]	200, 300, 400, 500, 600	-
축방향철근 및 심부구속철근 항복강도, f_y & f_{yh} [kgf/cm ²]	3,000, 4,000	-
축방향 철근비, ρ_l	1, 2, 3, 4 %	-
축력비, a	10, 20, 30 %	$a = P / (f_{ck}A_g)$
심부구속철근비, ρ_s	100, 75, 50, 25 % & 비내진	도로교설계기준(2000) 심부구속철근비 기준



(a) Yielding Definition A



(b) Yielding Definition B



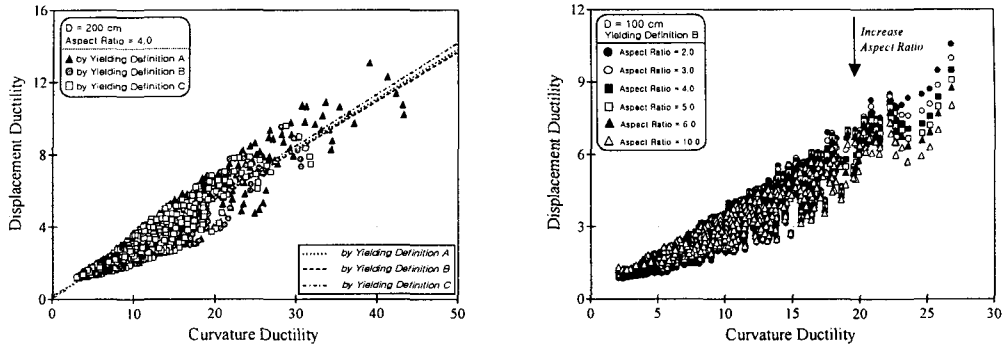
(c) Yielding Definition C

그림 1 항복상태의 정의

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{st}}{f_{cc}} \quad (1)$$

곡률연성과 변위연성의 상관관계를 주요변수별로 비교, 분석한 결과 그림 2(a)에 나타낸 것과 같이 항복상태의 정의 기준, 축방향철근비, 축력비, 심부구속철근 항복강도 등의 변화에 따라 곡률

연성 및 변위연성의 값은 차이를 나타내지만 전반적인 곡률연성과 변위연성의 상관관계는 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, 그림 2(b)에 나타난 것과 같이 형상비의 변화에 대해서는 형상비가 증가함에 따라 동일한 곡률연성에서 변위연성은 감소하는 경향을 나타내었다.



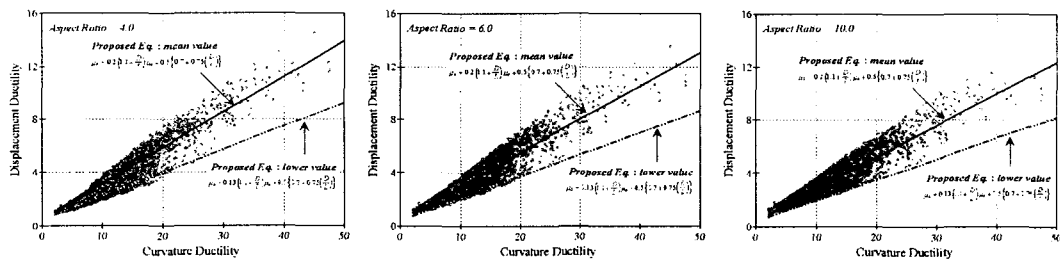
(a) 항복기준에 따른 비교 (b) 형상비에 따른 비교 - Yielding Definition B
 그림 2 곡률연성과 변위연성의 상관관계 분석결과

식 (2)는 본 연구에서 수행한 곡률연성과 변위연성의 상관관계에 관한 해석결과의 회귀분석 결과에 의한 관계식을 나타낸 것으로서, 곡률연성과 변위연성 상관관계의 평균값에 해당하는 식이며 기존 교량의 내진성능평가를 위한 연성도를 산정하기 위해서는 평균값에 대한 제안식인 식(2)를 적용하는 경우 합리적인 평가결과를 제공할 수 있으나, 안전측인 설계 및 평가를 위해서는 하한값을 사용하는 것이 합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 해석결과의 calibration을 통하여 식(2)의 계수 0.2 대신 0.13을 사용한 식(3)을 곡률연성과 변위연성의 상관식으로 제안하였다. 그림 3은 형상비에 따른 곡률연성과 변위연성의 해석결과와 제안식을 비교하여 나타낸 것으로서, 제안식을 사용할 경우 안전측이며 합리적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\mu_{\Delta} = 0.20 \left(1.1 + \frac{D}{L} \right) \mu_{\phi} + 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left(\frac{D}{L} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\mu_{\Delta} = 0.13 \left(1.1 + \frac{D}{L} \right) \mu_{\phi} + 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left(\frac{D}{L} \right) \right\} \quad (3)$$

여기서, μ_{Δ} : 변위연성도, μ_{ϕ} : 곡률연성도, D : 단면직경, L : 기둥길이



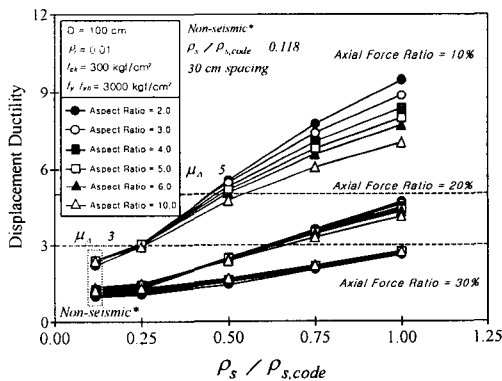
(a) 형상비 4.0인 경우 (b) 형상비 6.0인 경우 (c) 형상비 10.0인 경우

그림 3 곡률연성 및 변위연성 상관관계 제안식과 해석결과의 비교

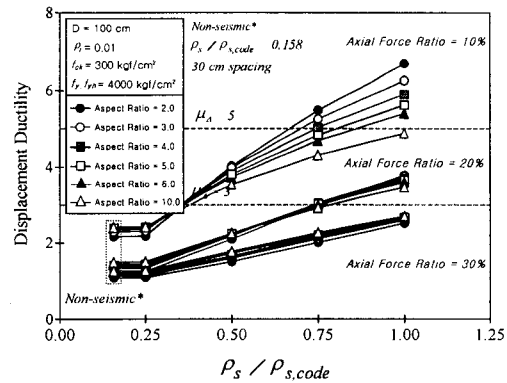
3. 변위연성과 심부구속철근량의 상관관계

심부구속철근량과 변위연성의 상관관계를 분석하기 위해 철근콘크리트 교각 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용하여 변수연구(parametric study)를 수행하였으며, 해석에 사용된 주요변수는 표 1과 같다. 변위연성도를 산정하기 위한 항복변위는 그림 1(b)의 항복상태를 기준으로 항복변위를 정의하였으며, 극한상태의 정의는 콘크리트 변형률이 극한변형률에 도달한 상태를 극한상태로 정의하여 분석을 수행하였다. 다양한 변수들의 조합에 대한 해석을 수행한 결과, 동일한 심부구속철근량(도로교설계기준에 대한 비율)에 대한 변위연성의 변화는 다음과 같은 경향을 나타내었다.

- ① 콘크리트 강도, 축력비, 형상비가 증가함에 따라 변위연성은 감소하는 경향을 나타낸다.
- ② 심부구속철근 항복강도가 증가할수록 변위연성은 감소하는 경향을 나타낸다. 일반적으로, 심부구속철근량이 동일한 경우에는 심부구속철근의 항복강도가 증가할수록 연성은 증가하지만, 도로교설계기준에 의한 심부구속철근량의 비율을 기준으로 한 경우에는 심부구속철근의 항복강도가 클수록 소요심부구속철근량이 작아지게 되므로 상대적으로 심부구속철근의 항복강도가 클수록 변위연성은 감소하는 경향을 나타낸다.
- ③ 축력비를 콘크리트 강도와 단면적의 비율로 정의하는 경우, 축력비가 10%인 경우에는 축방향철근비가 증가할수록 변위연성은 감소하는 경향을 나타내지만, 축력비가 20% 이상인 경우에는 축방향철근비가 증가할수록 변위연성은 증가하는 경향을 나타낸다.
- ④ 심부구속철근량이 증가할수록 변위연성은 증가하는 경향을 나타낸다.
- ⑤ 장주기 교각(변위연성 3.0 기준)인 경우, 축력비가 10%인 경우에는 모든 경우에 대해서 변위연성 3.0 이상을 나타내므로 현행 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 안전측인 설계결과를 제공하는 것으로 판단된다.
- ⑥ 단주기인 교각(변위연성 5.0 기준)에 대해서는 현행 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 축력비가 10% 이하인 경우에도, 경우에 따라서 비안전측인 설계결과를 제공할 수도 있을 것으로 판단된다.



(a) 철근항복강도 3,000 kgf/cm²



(b) 철근항복강도 4,000 kgf/cm²

그림 4 심부구속철근량에 따른 변위연성의 상관관계
(직경 100 cm, 콘크리트강도 300 kgf/cm², 축방향철근비 1%)

4. 연성도를 고려한 심부구속철근량 산정식의 제안

연성도를 고려한 심부구속철근량 산정식을 제안하기 위해 표 1의 변수들의 조합에 대해 심부구속철근량에 따른 곡률연성의 상관관계를 분석하여 곡률연성, 축력비, 콘크리트 강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근 항복강도, 축방향철근비 및 단면의 크기를 주요변수로 한 심부구속철근량 산정식을 제안하였다. 제안식은 다음의 식(4)와 같으며 식(4)의 우측 항은 심부구속철근의 수직간격을 고려하여 심부구속철근비의 최소값을 제한한 향으로서, 심부구속철근의 수직간격은 축방향철근의 좌굴을 방지하기 위하여 축방향철근 직경의 6배 이하로 제한하였다. 그림 5(a)는 단면직경 100 cm, 콘크리트 강도 300 kgf/cm², 축방향철근비 1%, 그림 5(b)는 단면직경 200 cm, 콘크리트 강도 300 kgf/cm², 축방향철근비 1%인 일반적인 철근콘크리트 교각에 대한 심부구속철근량과 곡률연성의 관계를 해석치와 제안식을 사용한 경우를 비교하여 나타낸 것으로서, 제안식을 사용할 경우 안전측이면서도 연성을 고려한 합리적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\rho_s = 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \cdot \alpha \cdot \beta + \gamma \geq \frac{1}{1.5} \frac{A_{sp}}{d_b D_{sp}} \quad (1)$$

$$\alpha = \left[3(\mu_\phi + 1) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 0.8\mu_\phi - 3.5 \right]$$

$$\beta = \left\{ \frac{f_y}{3,500} - 0.12 \right\}$$

$$\gamma = 0.1(\rho_l - 0.01)$$

f_{ck} : 콘크리트 압축강도 [kgf/cm²]

f_y : 축방향철근 항복강도 [kgf/cm²]

A_c : 심부콘크리트 단면적 [cm²]

d_b : 축방향철근 직경 [cm]

μ_ϕ : 곡률연성도

ρ_l : 축방향철근비

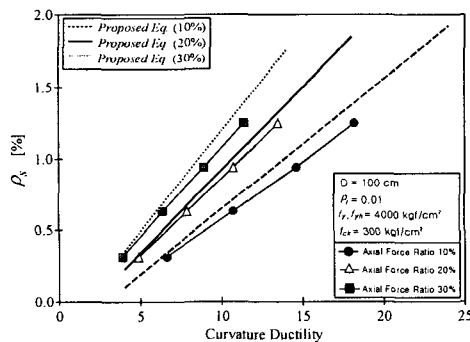
f_{yh} : 심부구속철근 항복강도 [kgf/cm²]

A_g : 단면적 [cm²]

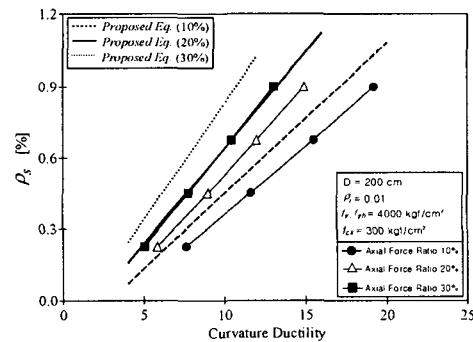
A_{sp} : 심부구속철근 단면적 [cm²]

D_{sp} : 심부콘크리트 직경 [cm]

P : 작용축력 [kgf]



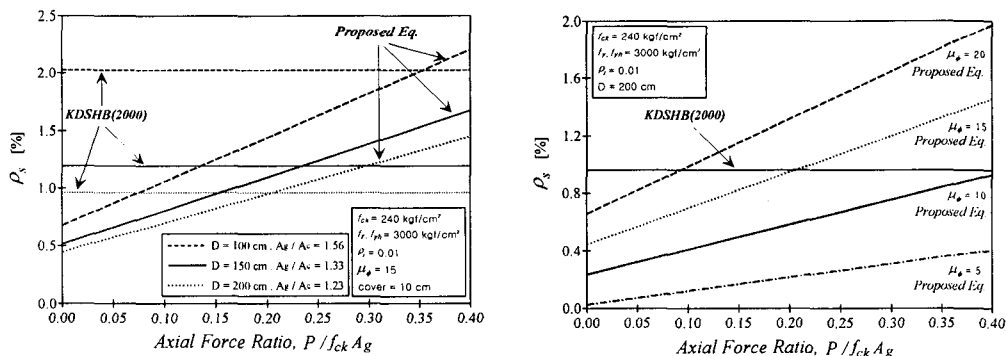
(a) 단면직경 100 cm인 경우



(b) 단면직경 200 cm인 경우

그림 5 심부구속철근량 산정 제안식과 해석결과의 비교

그림 6(a)는 콘크리트 강도 240 kgf/cm^2 , 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 $3,000 \text{ kgf/cm}^2$, 축방향철근비 1%인 경우에 대해 단면의 크기 및 축력비에 따른 심부구속철근량의 상관관계를 나타낸 것으로서, 본 연구에서 제안한 심부구속철근량 산정식은 축력비가 증가할수록 심부구속철근량이 증가하는데 비하여, 현행 도로교설계기준(2000)에 의한 심부구속철근량은 축력비에 상관없이 일정한 값을 나타낸다. 단면직경이 100 cm인 경우 축력비가 약 0.35 이하, 단면직경이 150 cm인 경우 축력비가 약 0.23 이하, 단면직경이 200 cm인 경우 축력비가 약 0.20 이하인 경우에 제안식을 사용한 경우가 도로교설계기준에 의한 심부구속철근량 보다 작은 값을 나타낸다. 즉, 현행 도로교설계기준에 의한 심부구속철근량 산정식은 단면크기에 관한 변수는 고려하고 있지만 축력에 관한 변수를 고려하고 있지 않으므로 축력이 상대적으로 높은 경우에는 비안전적인 설계결과를 제공할 수도 있을 것으로 판단된다. 그림 6(b)는 단면직경 200 cm, 콘크리트 강도 240 kgf/cm^2 , 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 $3,000 \text{ kgf/cm}^2$, 축방향철근비 1%인 경우의 소요곡률연성 (required curvature ductility)에 따른 심부구속철근량의 변화를 나타낸 것으로서, 제안식을 사용한 경우 소요곡률연성이 증가할수록 심부구속철근 요구량은 증가하는 경향을 나타낸다. 하지만, 도로교설계기준(2000)에 의한 심부구속철근량은 곡률연성을 변수로 고려하고 있지 않으므로 일정한 값을 나타낸다. 즉, 본 연구에서 제안한 심부구속철근량 산정식은 소요 곡률연성을 변수로 고려하고 있으므로 제안식을 사용할 경우 현행 도로교설계기준에 의한 설계결과 보다 합리적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.



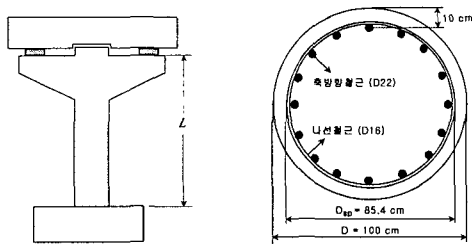
(a) 단면크기에 따른 심부구속철근량 비교 (b) 곡률연성도에 따른 심부구속철근량 비교

그림 6 제안식과 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식 비교

5. 심부구속철근량 산정 제안식의 비교

본 연구에서 제안한 심부구속철근량 산정식과 현행 국내 도로교설계기준(2000) 및 외국 설계기준과의 비교를 위하여 그림 7과 표 2의 조건에 따라 심부구속철근 요구량을 계산하여 비교하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 철근 항복강도가 $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우에 대해서는 제안식을 사용한 경우와 현행 도로교설계기준에 의한 심부구속철근량의 비율을 비교하면, 축력비 10%인 경우 56%, 축력비 20%인 경우 76.8%, 축력비 30%인 경우 97.6%로 계산되었으며, 철근 항복강도가 $4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우에 대해서는 축력비 10%인 경우 77.6%, 축력비 20%인 경우 106%, 축력비 30%인 경우 136%로 계산되었다. 즉, 철근 항복강도가 $3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우 현행 도로교설계기준

에 의한 심부구속철근량은 안전측인 설계결과를 제공하는 것으로 판단되나, 철근 항복강도가 4,000 kgf/cm²이고 축력비가 20% 이상인 경우에는 다소 비안전측인 설계결과를 제공할 수도 있을 것으로 판단된다. New Zealand code^[7,8]에 의한 심부구속철근량은 가장 작게 계산되었으며, New Zealand code와 Eurocode^[6]의 경우 심부구속철근량 산정시 축력의 영향을 고려하고 있지만 축력비가 20% 이하인 경우에는 축력비에 무관하게 최소규정에 의해 심부구속철근량이 결정되었다. ATC-32^[4]의 경우 제안식과 유사한 경향을 나타내지만 철근 항복강도가 3000 kgf/cm²인 경우에는 제안식이 작은 값을, 철근 항복강도가 3,000 kgf/cm²인 경우에는 제안식을 사용한 경우가 크게 계산되었다.

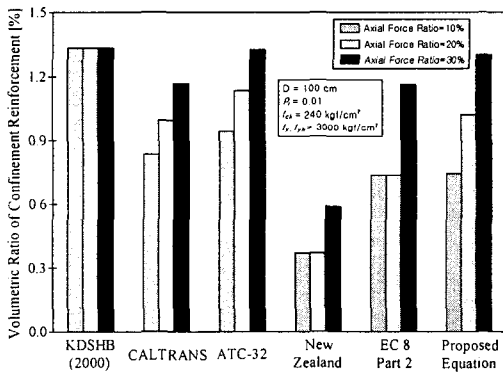


(a) 교각형식 (b) 단면상세

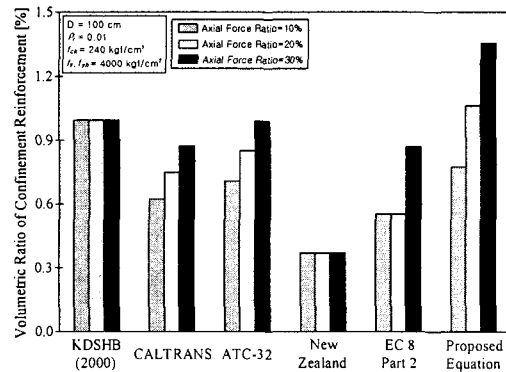
그림 7 예제교각의 형식 및 단면상세

표 2 예제 교각의 설계조건

교각 길이	f_{ck} [kgf/cm ²]	f_y & f_{yh} [kgf/cm ²]	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$	ρ_l
300 cm	240	3,000 4,000	0.1	0.01
			0.2	
			0.3	



(a) 철근 항복강도 3,000 kgf/cm²



(b) 철근 항복강도 4,000 kgf/cm²

그림 8 제안식과 각국 시방기준과의 비교 (단면직경 100 cm, 축력비 10, 20 & 30%)

6. 결론

본 연구는 연성도를 고려한 합리적인 심부구속철근량 산정식을 제안하기 위한 연구로서 철근콘크리트 기둥의 내진거동에 영향을 미치는 다양한 변수들의 조합에 대하여 변수연구를 수행한 결과, 곡률연성과 변위연성의 상관관계는 항복상태의 정의 기준에 따라 연성도의 크기는 달라지지만 곡률연성과 변위연성의 전반적인 상관관계는 유사한 경향을 나타내었으며, 해석결과를 바탕으로 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 예측하기 위한 관계식으로서 교각의 형상비를 주요변수로 한 상관식을 제안하였다.

현행 국내 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 콘크리트 강도, 심부구속철근 항복강도 및 단면적 비율만을 변수로 취하고 있으며 축력비가 10%인 경우 상당히 안전측인 설계결과를 제공하는 것으로 판단되나, 축력비가 상대적으로 높은 경우에는 현행 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 비안전측인 결과를 제공할 수도 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 연구에서는 보다 합리적인 심부구속철근량 산정식을 제안하기 위하여 다양한 변수들의 조합에 대한 비선형해석을 수행하였으며 해석결과와의 비교, 분석을 통하여 곡률연성, 축력비, 콘크리트 강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근 항복강도, 축방향철근비, 단면의 크기 및 심부구속철근의 수직간격을 주요변수로 한 심부구속철근량 산정식을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 연성도를 고려한 심부구속철근량 산정식은 국내에서 수행된 철근콘크리트 교각의 실험적 연구 및 해석적 연구결과를 바탕으로 한 것으로서, 철근콘크리트 교각의 내진설계시 보다 합리적이고 안전성과 경제성을 고려한 설계지침을 제공함과 동시에 구조물의 중요도 및 소요연성도에 따른 효율적인 내진설계가 가능할 것으로 판단되며, 향후 철근콘크리트 교각의 내진설계에 관한 설계기준 개정시의 참고자료로 제공될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
2. 손혁수, 심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구, 박사학위논문, 영남대학교, 2002. 8.
3. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials. 16-th edition*, Washington, D.C. 1995.
4. ATC-32, *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, Applied Technology Council, California, USA, 1996.
5. Caltrans, *Bridge Design Specifications*, California Department of Transportation, Sacramento, January, 1993.
6. Eurocode 8 Part 2, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*, European Committee for Standardization, 1996.
7. New Zealand Standard., *Concrete Structures Standard - Part 1 : Design of Concrete Structures*, NZS 3101, 1995.
8. New Zealand Standard., *Concrete Structures Standard - Part 2 : Commentary on the Design of Concrete Structures*, NZS 3101, 1995
9. Priestley M. J. N., Seible F., and Calvi G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley, New York, 1996.
10. Park, R. and Paulay T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.