Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.15, No.5, pp. 715~725, October 2003

지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 소요연성도에 따른 심부구속철근량

손혁수 [1] · 이재훈 [1]*

[1]영남대학교 토목공학과

(2003년 5월 7일 원고접수, 2003년 7월 3일 심사완료)

Confinement Steel Amount for Ductility Demand of RC Bridge Columns under Seismic Loading

Hyeok-Soo Son [1] and Jae-Hoon Lee [1]*

[1] Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749, Korea

(Received May 7, 2003, Accepted July 3, 2003)

ABSTRACT

This paper is a part of a research program to develop a new design method for reinforced concrete bridge columns under seismic loading. The objectives of this paper are to investigate the relationship between ductility and confinement steel amount and to propose a design equation for reinforced concrete bridge columns. Computer program NARCC was used for parametric study, which was proved to provide good and conservative analytical result especially for deformation capacity and ductility factor compared with test result. A total of 7,200 reinforced concrete columns confined with spirals or perfect circular hoops were selected by combination of variables such as section diameter, aspect ratio, concrete compressive strength, yielding strength of longitudinal and confinement steel, longitudinal steel ratio, axial load ratio, and confinement steel ratio. Based on the parametric study a new design equation for confinement steel amount considering ductility demand was proposed, which can be used in the new seismic design method, i.e. ductility-based seismic design, for RC bridge columns.

Keywords : reinforced concrete bridge columns, seismic design, confinement steel amount, ductility demand, proposed design equation.

1. 서 론

국내에서 교량에 대한 내진설계기준이 제정된 이후, 철근콘크리트 교각에 과도하게 배근되는 심부구속철근으로 인하여 현장시공에 어려움을 겪어오고 있는 실정이다. 그 이유로는 철근콘크리트 교각의 내진설계 개념과 설계기준을 합리적으로 반영하지 못한 설계가 수행되고 있다는 것을 들 수 있으나, 현행 도로교설계기준[1] 내진설계규정 중 심부구속철근량에 대한 최소규정이 중진 지진지역인 우리나라의 경우에는 다소 과도한 것이 아닌가 하는 의문이 지진공학연구센터(KEERC)의 연구자들을 중심으로 제기되고 있다. 도로교설계기준[1] 내진설계규정의 상당부분은 AASHTO[10]를 바탕으로 하고 있으며, 심부구속철근량에 대한 최소규정 역시 AASHTO[10]와 동일하다. 이로 인해 심부구속철근의 시공이 간단하지 않은 실정인데, 이는 교각의 소성힌지부분에 많은 양의 심부구속철근을 배근하여 지진하중 작용시 충분한 소성거동을 확보하는 완전연성(full ductility)의 설계개념을 채택하고 있기 때문이다.

즉, Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 현행 설계기준에서는 응답수정계수 R을 기준으로 하여, 지진하중 작용시 축방향철근이 탄성영역 내에서 거동하는 탄성설계의 경우에는 응답수정계수 R을 적용하지 않고(R = 1.0) 도로교설계기준 4.3.7.2의 횡방향철근 규정에 따라 이에 해당하는 ρ_{ns}의 횡방향철근량으로 설계한다. 지진하중 작용으로 축방향철근이 항복하는 경우에는 3.0이나 5.0의 응답수정계수 R을 적용하고 도로교설계기준 6.8.2.1의 심부구속철근 규정에 따라 $\rho_{s,code}$의 횡방향철근량으로 설계한다. 따라서, 축방향철근이 항복하기만 하면 소성변형의 정도와 관계없이 항상 $\rho_{s,code}$의 심부구속철근을 배근하여야 한다. 그러나, 최근에 수행된 교각의 내진성능에 대한 박종협 등[2], 이재훈 등[6-8], 정영수 등[9]의 연구에서 비내진 횡방향철근량을 갖는 교각의 경우에도 비교적 큰 연성능력을 발휘할 수 있다고 보고된 바 있으며, 해외에서도 Watson 등[22]과 Wehbe 등[23]이 소요연성도에 따른 횡방향철근 요구량에

* Corresponding author
Tel : 053-810-2419 Fax : 053-814-2410
E-mail : jholee@yu.ac.kr

대한 연구결과를 보고한 바 있다. 따라서, 특히 우리나라와 같은 중진 지진지역의 경우에는 완전연성을 확보하기 위한 강진지역의 내진설계개념보다는 한정연성(limited ductility) 내진설계와 같이 연성도를 직접 고려한 내진설계법이 보다 합리적이며 경제적인 내진설계 방법으로 인식되고 있다.

연성도를 고려한 내진설계법의 기본 개념은 Fig. 1(a)에 점선으로 나타낸 바와 같이 3.0이나 5.0의 응답수정계수 R을 적용하는 소성거동 영역을 한정연성 구간과 완전연성 구간으로 구분하고, 한정연성 구간에서는 교각의 소요연성도(ductility demand, required ductility)에 따라 심부구속철근량을 배근함으로써 합리적인 설계를 유도하며 과도한 횡방향철근의 배근으로 인한 시공성 문제를 해결하자는 것이다. 이러한 설계법의 개발을 위해서는 소요연성도와 심부구속철근량의 관계가 Fig. 1(a)의 Ⓐ, Ⓑ, Ⓒ 중 어떠한 관계를 가지는지 규명하고 합리적인 관계식을 개발하는 것이 필수적이다. 또한, 완전연성거동이 요구되는 연성도를 의미하는 point D를 결정하는 작업과 point D보다 소요연성도가 더 큰 경우에도 현행 심부구속철근량 $\rho_{s,code}$로 만족되는지 검토하는 작업이 선행되어야 한다.

Fig. 1(b)는 연성도를 고려한 철근콘크리트 교각의 내진설계법의 설계과정을 나타낸 것으로서, 먼저 교각의 단면형상 및 크기와 축방향철근을 결정하여 강도(strength, force capacity)에 대하여 설계한 후, 변위 및 연성설계로서 소요연성도(교각에 요구되는 연성능력)에 따른 심부구속철근을 설계하는 것이다. 이러한 내진설계법의 개발 및 적용을 위해서는 철근콘크리트 교각의 곡률연성도와 변위연성도의 상관관계식 및 연성도와 심부구속철근량의 상관관계식의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

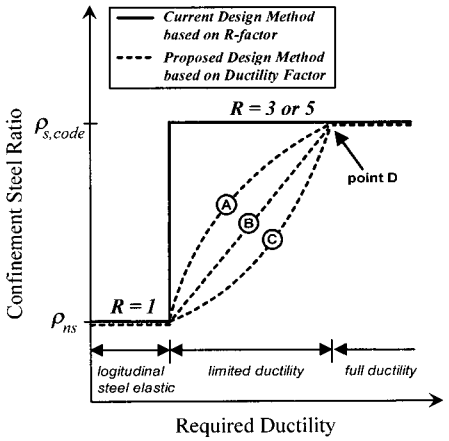
따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 교각의 심부구속철근량 산정에 관한 각 설계기준 식을 비교하고, 해석적 연구를 통하여 연성도와 심부구속철근량의 상관관계를 비교분석하여, 연성도를 주요변수로 한 철근콘크리트 교각의 심부구속철근량 산정식을 제안하고자 한다.

2. 심부구속철근량 산정식의 비교

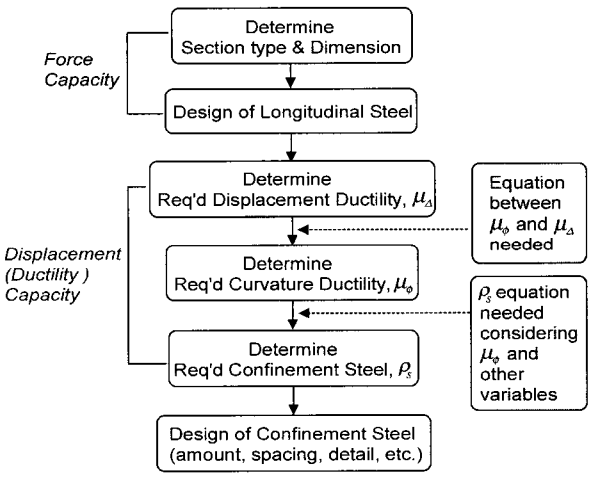
철근콘크리트 교각의 내진설계는 교각의 소성힌지(plastic hinge) 영역에 심부구속철근을 적절하게 배근하여 충분한 연성능력을 확보함으로써 설계지진력에 저항하도록 하는 것이라고 할 수 있다. 따라서, 우리나라를 포함한 세계 각국의 내진설계에 관한 설계기준에서는 소성힌지 영역의 심부구속철근량을 명시하고 있는데, 주요 설계기준별 심부구속철근량 산정식은 Table 1과 같다. Table 2는 설계기준별 심부구속철근량 산정식의 주요변수를 비교하여 나타낸 것으로서, 콘크리트 압축강도(f_{ck}, f_c')와 심부구속철근 항복강도(f_{yh})는 모든 설계기준에서 공통으로 고려하고 있으나, 그 외의 변수들에 대하여는 설계기준별로 선택적으로 채택되어 있다.

변수들 중, 심부콘크리트 단면적(A_c)에 대한 전체단면적(A_g)의 비율은 ATC-32[13]를 제외한 모든 설계기준에서 채택하고 있으나, NZS 3101[18),19)]과 Eurocode 8[15]을 제외한 나머지 설계기준에서는 Table 1에 나타낸 각 설계기준의 두 식 중에서 큰 값을 사용하므로 지름이 약 1.2 m 이상인 실제 교각의 크기에 대하여 이 비율에 의하여 심부구속철근량이 결정되는 경우는 발생하지 않는다.

변수들 중, 축력비($P/f_{ck}A_g$), 축방향철근비(ρ_l, p_l) 소요연성도(μ_ϕ)는 설계기준별로 선택적으로 채택되어 있다. Table 1과 Table 2에 나타낸 바와 같이, 도로교설계기준(Korean Design Specifications for Highway Bridges,



(a) Schematic relationship between ductility and confinement steel ratio



(b) Design process of ductility-based seismic design method

Fig. 1 Seismic design concept based on ductility demand for RC bridge columns

Table 1 Comparison of confinement steel equations for columns with spirals or circular hoops

Codes (specifications)	Equations of transverse reinforcement	Remarks
KDSHB (2000)[1]	$\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_{ck}}{f_{yh}}$ $\rho_s = 0.12\frac{f_{ck}}{f_{yh}}$	·
AASHTO(1995)[10]	$\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_c'}{f_{yh}}$ $\rho_s = 0.12\frac{f_c'}{f_{yh}}$	·
AASHTO, LRFD 1st Ed.(1994)[11]	$\rho_s = 0.16\frac{f_c'}{f_{yh}}\left\{0.5 + 1.25\frac{P}{f_c'A_g}\right\}$ $\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_c'}{f_{yh}}$	$0.5 + 1.25\frac{P}{f_c'A_g} \geq 1.0$
AASHTO, LRFD 2nd Ed.(1998)[12]	$\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_c'}{f_{yh}}$ $\rho_s = 0.12\frac{f_c'}{f_{yh}}$	·
CALTRANS[14]	$\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_c'}{f_{yh}}\left\{0.5 + 1.25\frac{P_e}{f_c'A_g}\right\}$: $D \leq 90\ cm$ $\rho_s = 0.12\frac{f_c'}{f_{yh}}\left\{0.5 + 1.25\frac{P_e}{f_c'A_g}\right\}$: $D > 90\ cm$	minimum value : $\rho_s = 0.45\left[\frac{A_g}{A_c} - 1\right]\frac{f_{ck}}{f_{yh}}$
ATC-32[13]	$\rho_s = 0.16\frac{f_{ce}'}{f_{ye}}\left\{0.5 + 1.25\frac{P_e}{f_{ce}'A_g}\right\} + 0.13(\rho_l - 0.01)$ $\rho_s = 0.0002\,n_b$	$f_{ce}' = 1.3f_c'$ $f_{ye} = 1.1f_{yh}$
NZS 3101[18,19]	$\rho_s = 1.4\left\{\frac{A_g}{A_c}\frac{(\mu_\phi - 33p_tm + 22)}{111}\frac{f_c'}{f_{yt}}\frac{N^*}{\phi f_c'A_g}\right\} - 0.0084$ $\rho_s = \frac{A_{st}}{110\,d''}\frac{f_y}{f_{yt}}\frac{1}{d_b}$	for severe earthquake $\mu_\phi = 20$ recommend
Eurocode 8[15]	$\rho_s = \omega_{wd,c}\frac{f_{cd}}{f_{yd}}$ $\left(f_{cd} = \frac{f_c'}{1.5},\ f_{yd} = \frac{f_{yt}}{1.15}\right)$ $\omega_{wd,c} \geq 1.4\left\{1.74\frac{A_c}{A_{cc}}(0.009\,\mu_c + 0.17)\eta_k - 0.07\right\} \geq \omega_{w,\min}$	for ductile behavior $\omega_{w,\min} = 0.12 \leftarrow \mu_c = 13$ for limited ductile behavior $\omega_{w,\min} = 0.08 \leftarrow \mu_c = 7$

Table 2 Comparison of variables included in equations for required confinement steel

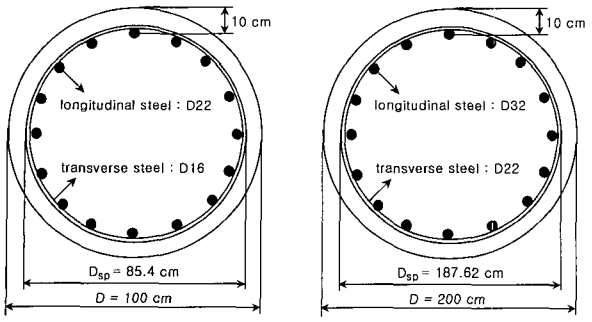
Variables	KDSHB (2000)	AASHTO		CALTRANS	ATC-32	NZS 3101	EC 8	Proposed Eq.
		16th ed. & LRFD 2nd ed.	LRFD 1st ed.					
Concrete compressive strength	◉	◉	◉	◉	◉	◉	◉	◉
Yield strength of transverse steel	◉	◉	◉	◉	◉	◉	◉	◉
Ratio of gross sectional area to core concrete area	◉	◉	◉	◉	-	◉	◉	◉
Axial force ratio	-	-	◉	◉	◉	◉	◉	◉
Longitudinal steel ratio	-	-	-	-	◉	◉	-	◉
Yield strength of longitudinal steel	-	-	-	-	-	◉	-	◉
Curvature ductility	-	-	-	-	-	◉	◉	◉

KDSHB)[1]과 AASHTO[10]는 CALTRANS[14], ATC-32[13], NZS 3101[18,19], Eurocode 8[15] 등 다른 모든 설계기준이 고려하고 있는 축력의 영향을 고려하고 있지 않다. 축방향 철근비(ρ_l, p_t)는 ATC-32[13]와 NZS 3101[18,19]의 식에서 고려되고 있으며, 특히 소요곡률연성도(μ_ϕ)는 완전연성 설계개념과 함께 한정연성(limited ductility) 설계개념도 채택하고 있는 Eurocode 8과 성능설계(capacity design)법을 채택하고 있는 NZS 3101의 식에서 고려되고 있다.

3. 연성도 분석을 위한 교각의 해석 및 변수

3.1 교각의 변수

심부구속철근량과 변위연성도의 상관관계를 분석하고 연성도에 따른 심부구속철근량 산정식을 개발하기 위하여, Fig. 2와 같은 원형단면을 갖고 나선철근이나 완전원형후프를 사용한 철근콘크리트 캔틸레버 교각을 채택하였다.



(a) D = 100 cm (b) D = 200 cm

Fig. 2 Details of column section

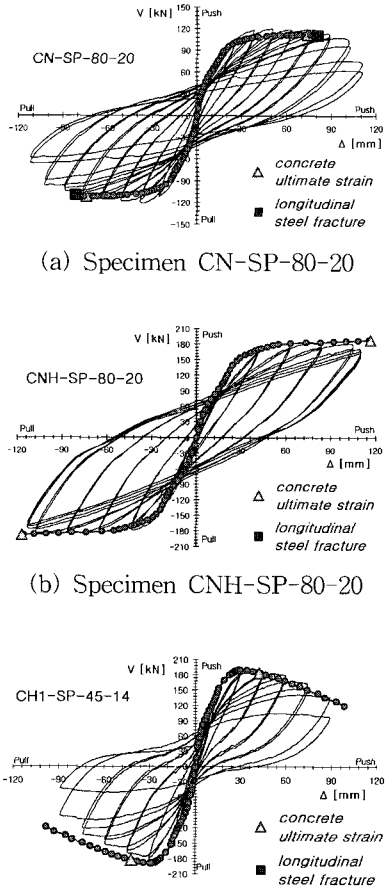
Table 3 Selected of parameters

Parameters	Values
Diameter of section, D [cm]	100, 200
Aspect ratio, L/D	2, 3, 4, 5, 6, 10
Concrete compressive strength, f_{ck} [kgf/cm^2]	200, 300, 400, 500, 600
Yield strength of longitudinal & transverse stel, f_y & f_{yh} [kgf/cm^2]	3,000, 4,000
Longitudinal steel ratio, ρ_l	1, 2, 3, 4 %
Axial force ratio, α	10, 20, 30 %
Volumetric ratio of transverse steel, ρ_s	100, 75, 50, 25 % & non-seismic

교각의 변수로는 교각의 내진성능에 영향을 주는 주요 변수로서, Table 3에 나타낸 바와 같은 7 개의 변수를 조합하였다. 즉, 단면의 크기는 지름 100 cm와 200 cm의 2 가지, 교각 형상비는 2~10 범위의 6 가지, 콘크리트의 압축강도는 200~600 kgf/cm^2 범위의 6 가지, 철근의 항복강도는 3,000 kgf/cm^{2}과 4,000 kgf/cm^{2}의 2 가지, 축방향 철근비는 1~4 % 범위의 4 가지, 축력비는 10~30 % 범위의 3 가지, 횡방향철근비는 도로교설계기준 6.8.2.1의 심부구속철근 규정을 기준으로 1/4씩 감소하는 양과 도로교설계기준 4.3.7.2의 횡방향철근 규정에 따라 설계된 비내진 횡방향철근량 등 5 가지를 채택하였다. 이와 같은 7 개의 각 변수들을 조합하여 총 7,200 개의 교각에 대한 포락곡선 해석을 수행하였고 연성도 해석결과를 대상으로 분석하였다.

3.2 철근콘크리트 교각의 비선형 해석

본 연구에서는 철근콘크리트 교각의 모멘트-곡률 곡선 및 하중-변위 포락곡선을 예측하기 위해 콘크리트의 재료 비선형, 반복하중에 의한 철근의 응력-변형률 특성, 축력의 영향을 고려한 축방향철근의 부착슬립 모델, 축방향철근의 파단기준 등을 고려하여 손혁수 등[3,4]이 개발한 비선형해석 프로그램 NARCC (Nonlinear Analysis of



(a) Specimen CN-SP-80-20

(b) Specimen CNH-SP-80-20

(c) Specimen CH1-SP-45-14

Fig. 3 Comparison of experimental and analytical results by use of NARCC

Reinforced Concrete Columns)을 사용하였다. NARCC는 변형평면회전기법(rotating plane method)을 이용하여 단면의 모멘트-곡률 곡선을 구성한 후, 각 하중단계별 기둥 길이에 따른 곡률분포를 수치적분을 통하여 기둥상단의 휨작용에 의한 횡방향변위를 계산하며 축방향철근 부착슬립에 의한 변위 및 전단작용에 의한 변위를 모두 고려하여 하중-변위 곡선을 구성할 수 있는 프로그램이다.

Fig. 3은 프로그램 NARCC를 이용한 포락곡선 해석결과를 이재훈 등[7,8]의 실험결과와 비교한 것으로서, Fig. 3의 (a)와 (b)는 도로교설계기준의 심부구속철근요구량과 유사한 심부구속철근이 배근된 보통강도 콘크리트의 나선철근 기둥 시험체이며, (c)는 도로교설계기준의 심부구속철근요구량의 44 %가 배근된 고강도 콘크리트의 나선철근 기둥 시험체이다. 즉, Fig. 3(a)는 콘크리트 압축강도 27.5 MPa, 축방향철근 항복강도 349 MPa, 횡방향철근 항복강도 360 MPa, 축력비 20.9 %, 축방향철근비 1.26 %, 횡방향철근비 0.0099(도로교설계기준 심부구속철근량의 1.08배)인 CN-SP-80-20 시험체[8]이다. Fig. 3(b)는 콘크리트 압축강도 27.5 MPa, 축방향철근 항복강도 337 MPa, 횡방향철근 항복강도 360 MPa, 축력비 20.4 % 횡방향철근비 0.0099

(도로교설계기준 심부구속철근량의 1.01배)로서 Fig. 3(a)의 CN-SP-80-20 시험체와 동일하거나 유사하지만, 축방향철근비가 3.23 %인 CNH-SP-80-20 시험체[8]이다. Fig. 3(c)는 콘크리트 압축강도 60 MPa, 축방향철근 항복강도 425 MPa, 횡방향철근 항복강도 414 MPa 등 콘크리트와 철근의 재료강도가 상대적으로 고강도이며, 축력비는 14.1 %이고, 축방향철근비 1.26 %, 횡방향철근비는 0.0079로서 도로교설계기준 심부구속철근량의 0.44배가 배근된 CH1-SP-45-14 시험체[7]이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 프로그램 NARCC는 초기하중 단계뿐만 아니라 최대하중 이후의 곡선 하강부도 비교적 정확하게 예측하며, 특히 변형능력 및 연성도에 대하여는 실험결과에 비하여 안전측의 포락곡선 해석결과를 제공한다[3,4].

3.3 철근콘크리트 교각의 연성도 평가

철근콘크리트 교각의 변위연성도는 일반적으로 식(1)과 같이 극한변위(Δ_u)와 항복변위(Δ_y)의 비율로 정의한 부재의 변위연성도(displacement ductility, μ_Δ)로 나타낼 수 있으며, 부재 및 단면을 구성하고 있는 여러 가지 변수에 의해서 영향을 받는다. 변위연성도를 산정하기 위한 항복상태의 기준은 Fig. 4에 나타낸 것과 같은 Priestley 등이 제안한 방법[20,21]을 기준으로 항복상태를 정의하였다.

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

극한상태의 정의는 심부구속철근이 충분히 배근되어 있는 경우 콘크리트 변형률이 극한변형률에 도달한 상태 또는 축방향철근의 파단상태를 극한상태로 정의할 수 있으나, 본 연구에서는 콘크리트 변형률이 Mander 등[16]이 제안한 식(2)의 변형률에 도달한 상태를 극한상태로 정의하였다.

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\,\rho_s f_{yh}\,\varepsilon_{su}}{f_{cc}'} \tag{2}$$

이는, 해석결과를 통하여 축방향철근비, 축력비, 콘크리트 및 철근의 강도가 증가할수록 축방향철근의 파단보다는 콘크리트가 극한상태에 먼저 도달하여 콘크리트의 파괴가 지배적인 것으로 분석되었고, 이재훈 등[7,8]의 실험결과를 분석한 결과 이와 같은 파괴의 정의를 적용하는 경우 연성도가 안전측으로 평가되었기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 일관성 있는 경향분석을 위해 극한상태의 기준을 콘크리트 변형률이 극한변형률에 도달한 상태를 극한상태로 정의하여 변위연성도를 산정하였다.

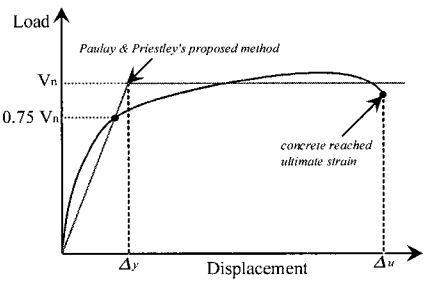


Fig. 4 Definition of yield displacement and ultimate displacement

4. 변위연성도와 심부구속철근량의 상관관계

4.1 콘크리트 강도, 축력비 및 형상비의 영향

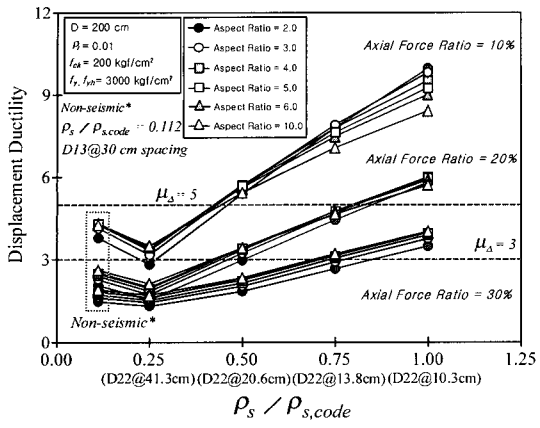
Fig. 5는 단면지름 200 cm, 축방향철근비 1 %, 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 3,000 kgf/cm^{2}인 교각에 대해 심부구속철근량에 따른 변위연성도의 변화를 축력비와 형상비를 주요변수로 나타낸 것으로서, 콘크리트 압축강도, 축력비, 형상비가 증가할수록 변위연성도는 감소하는 경향을 나타낸다. 심부구속철근량이 증가할수록, 또 축력비가 낮을수록 형상비의 증가에 따른 변위연성도의 감소가 두드러지게 나타나며, 심부구속철근량이 적고 축력비가 20 % 이상으로 높은 경우에는 형상비에 따른 변위연성도의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5(a)의 콘크리트강도 200 kgf/cm^{2}인 경우, 도로교설계기준 소요심부구속철근량의 25 %(ρ_s = 0.002, s = 41.26 cm)를 사용한 경우가 비내진상세의 심부구속철근량(ρ_s = 0.00092, s = 30 cm)을 사용한 경우보다 심부구속철근량이 2배 이상으로 많음에도 불구하고 변위연성도는 더 작은 값을 나타내고 있다. 이는 심부구속철근량이 많다하더라도 심부구속철근의 수직간격(s)이 상대적으로 큰 경우에는 연성능력이 저하됨을 의미하는 것으로서 심부구속철근의 수직간격 역시 중요한 변수임을 나타내고 있다.

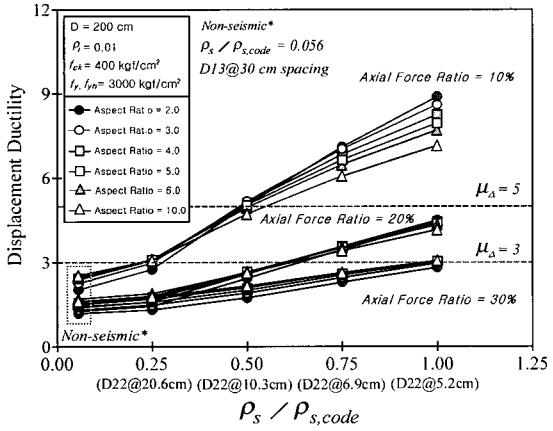
본 연구에서 수행한 총 7,200개의 해석결과를 분석한 결과, 심부구속철근의 수직간격이 30 cm 이하인 경우에는 심부구속철근량이 증가할수록 변위연성도가 증가하는 경향을 나타내지만, 수직간격이 30 cm 이하인 경우에는 심부구속철근량이 증가하더라도 심부구속철근 간격이 30 cm인 경우보다 변위연성도가 감소하는 것으로 분석되었다. 즉, 심부구속철근량과 변위연성도의 상관관계는 심부구속철근의 수직간격이 30 cm 이하인 경우에 비례관계를 보이며, 동일한 심부구속철근량에 대해서 심부구속철근의 지름(크기)보다는 심부구속철근의 수직간격이 더 중요한 변수임을 알 수 있다.

4.2 축방향철근비의 영향

Fig. 6은 단면지름 100 cm, 형상비 3.0, 콘크리트 압축강도 300 kgf/cm^2, 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도



(a) When f_{ck} = 200 kgf/cm^2



(b) When f_{ck} = 400 kgf/cm^2

Fig. 5 Displacement ductility and confinement steel ratio (effect of concrete compressive strength, axial force ratio, and aspect ratio)

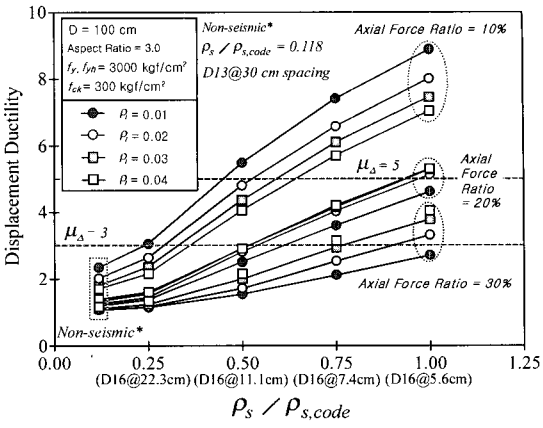


Fig. 6 Displacement ductility and confinement steel ratio (effect of longitudinal steel ratio and axial force ratio)

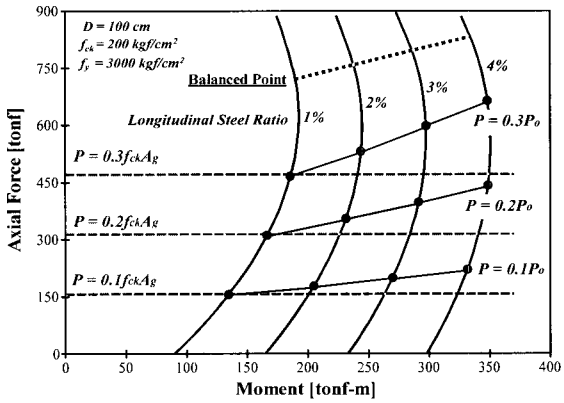


Fig. 7 Axial force ratio on P-M interaction diagram

3,000 kgf/cm^{2}인 교각에 대해 심부구속철근량에 따른 변위연성도의 변화를 축력비와 축방향철근비를 주요변수로 나타낸 것으로서, 축방향철근비에 따른 변위연성도는 축력비에 따라 다른 경향을 나타낸다. 즉, Fig. 6에서 축력비가 10%인 경우에는 축방향철근비가 증가함에 따라 변위연성도가 감소하여 축방향철근비가 0.04인 교각은 축방향철근비가 0.01인 교각에 비하여 작은 값의 변위연성도를 보인다. 그러나 축력비가 20%인 경우에는 축방향철근비에 따른 뚜렷한 경향을 발견할 수 없으며, 축력비가 30%인 경우에는 축력비가 10%인 경우와는 반대로 축방향철근비가 증가함에 따라 변위연성도가 증가하여 축방향철근비가 0.04인 교각은 축방향철근비가 0.01인 교각에 비하여 큰 값의 변위연성도를 보인다.

이와 같이 축방향철근비와 축력비에 따라 변위연성도의 경향이 달라지는 이유는 축력비를 정의하는 방법의 차이 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 기둥에서의 축력비는 콘크리트 압축강도와 단면적의 곱을 기준으로 한 축력비 ($P / f_{ck} A_g$) 또는 축방향철근의 영향을 고려한 순수축력강도($P_o = 0.85 f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$)를 기준으로 한 축력비($P / P_o$)로 정의할 수 있다. 본 연구에서 채택하고 있는 축력비($P / f_{ck} A_g$)는 내진성능 연구분야에서 주로 사용되고 있는 정의로서, 축력비가 동일하면 축방향철근비 및 축방향철근의 항복강도와 무관하게 일정한 축력 값을 나타낸다. 그러나, 축력비를 순수축력강도의 비율로 정의하는 경우에는 축력비가 동일하더라도 축방향철근비 및 축방향철근 항복강도에 따라 작용하는 축력의 값이 변화하게 되어, 축방향철근비가 증가하면 균형하중(balanced load)과 유사하게 증가된다.

Fig. 7은 두 가지 축력비의 정의에 따른 축력의 차이를 축력-모멘트 상관도에 나타낸 것으로서, 축방향철근비가 1%인 경우에는 두 가지 정의 중 어떠한 정의를 적용하여도 축력의 값은 동일하다. 그러나, 축방향철근비가 2% 이상인 경우에는 콘크리트 압축강도와 단면적의 비율로 정의하는 경우가 순수축력강도의 비율로 정의하는 경우 보다 낮은 축력 값을 나타낸다. 즉, 축방향철근비가 증가하면 연성능력의 하한값을 의미하는 균형하중도 증가하지만, 콘크리트 강도와 단면적의 비율로 정의하는 경우에는 축

방향철근비가 증가하더라도 작용축력의 크기는 일정하므로 상대적으로 축력의 영향을 적게 받고 있다고 할 수 있다. 이에 따라, 철근콘크리트 교각의 내진성능 연구분야에서 주로 사용되고 있으며 본 연구에서도 채택하고 있는 축력비, 즉 콘크리트 압축강도와 단면적의 비율로 정의하는 축력비($P/f_{ck}A_g$)를 적용하는 경우에는 축방향철근비에 따른 변위연성도가 축력비에 따라 다른 경향을 나타낸다고 판단된다.

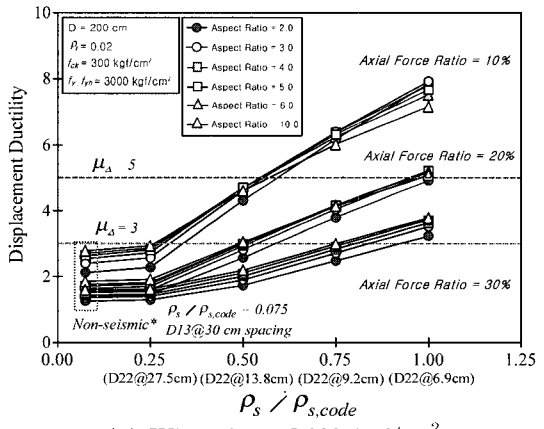
4.3 심부구속철근 항복강도의 영향

Fig. 8은 단면지름 200 cm, 콘크리트 압축강도 300 kgf/cm^2, 축방향철근비 2 %인 교각에 대해 심부구속철근량에 따른 변위연성도의 변화를 나타낸 것으로서, 심부구속철근 항복강도가 4,000 kgf/cm^{2}인 경우(Fig. 8(b))가 3,000 kgf/cm^{2}인 경우(Fig. 8(a))보다 변위연성도가 작음을 나타낸다. 일반적으로 심부구속철근량(철근지름 및 간격)이 동일한 경우에는 심부구속철근의 항복강도가 증가할수록 교각의 연성도가 증가하지만, 도로교설계기준의 심부구속철근비에 대한 비율을 기준으로 한 경우에는 심부구속철근의 항복강도가 클수록 심부구속철근 요구량이 작아지게 되므로 변위연성도가 감소하는 결과를 나타내게 된다.

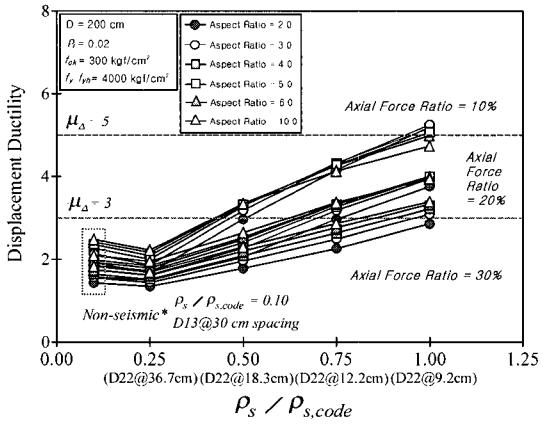
4.4 단면크기의 영향

Fig. 9는 콘크리트 압축강도 300 kgf/cm^2, 철근 항복강도 4,000 kgf/cm^2, 형상비 3.0인 교각에 대해 심부구속철근량에 따른 변위연성도의 변화를 단면크기별로 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)와 (b)를 비교하면, 축력비가 10 %로 낮은 경우에는 단면 지름(D)이 200 cm인 교각이 100 cm인 교각보다 변위연성도가 다소 작은 경향을 나타내지만, 축력비가 30 %로 높은 경우에는 오히려 연성도가 다소 큰 결과를 보인다.

Fig. 9(a)의 경우 단면지름 100 cm, 심부콘크리트 단면지름 85.4 cm로서 전체단면과 심부콘크리트 단면의 면적비가 1.37이며, Fig. 9(b)의 경우 단면지름 200 cm, 심부콘크리트 단면지름 187.62 cm로서 전체단면과 심부콘크리트 단면의 면적비가 1.136이다. 즉, 단면 지름이 200 cm인 경

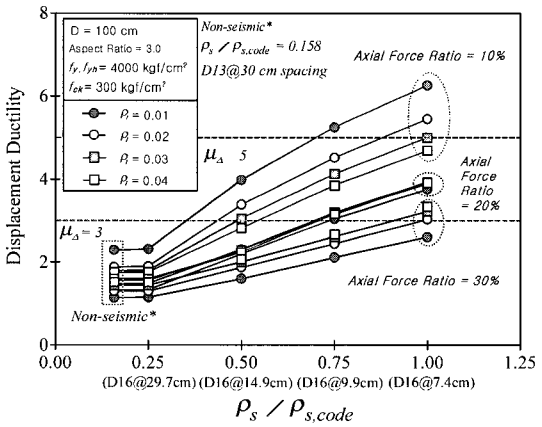


(a) When f_{yh} = 3,000 kgf/cm^2

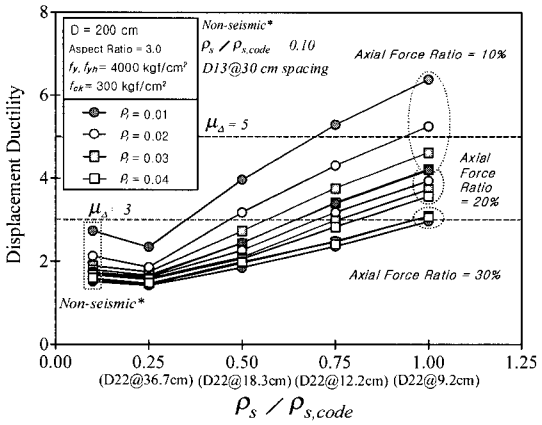


(b) f_{yh} = 4,000 kgf/cm^2

Fig. 8 Displacement ductility and confinement steel ratio (effect of yield strength of confinement steel)



(a) When D = 100 cm



(b) When D = 200 cm

Fig. 9 Displacement ductility and confinement steel ratio (effect of size of cross section)

우가 100 cm인 경우보다 단면적은 더 크지만 전체단면과 심부콘크리트 단면의 면적비는 더 작은 값을 나타낸다.

따라서, 단면지름이 200 cm인 경우가 100 cm인 경우보다 도로교설계기준에 따른 심부구속철근 요구량이 더 작게 계산되어 실질적인 심부구속철근비가 작으므로, 4.3에서 Fig. 8에 대하여 설명한 바와 같이 도로교설계기준의 심부구속철근비에 대한 비율을 기준으로 변위연성도를 나타낼 때에는 이와 같은 경향이 나타나며, 축력비의 정의에 따른 영향도 받기 때문이다. 즉, 축력비 및 축방향철근비가 높은 경우에는, 4.2에서 언급한 바와 같이, 콘크리트 압축강도와 단면적의 곱을 기준으로 한 축력비($P / f_{ck} A_g$)의 정의에 따라 축력비가 증가하더라도 연성능력의 하한값을 의미하는 균형하중에 비하여 상대적으로 낮은 축력을 받는 상태에 있는 경우가 발생하므로 변위연성도의 경향이 달라질 수 있다. 결국, 도로교설계기준의 심부구속철근비에 대한 비율을 기준으로 변위연성도를 나타낼 때에는 단면의 크기에 따라 두 개의 식 중 지배적인 식이 각기 다르므로 변위연성도의 값에 영향을 주지만, 전체적인 경향을 살펴볼 때 그 값의 차이가 현저하지는 않으므로 단면크기가 연성에 미치는 영향은 크지 않다고 할 수 있을 것이다.

5. 심부구속철근량 산정식의 제안

3장에서 언급한 Table 3의 변수들을 조합한 총 7,200개의 교각에 대한 해석결과에 대하여 4장과 같이 심부구속철근량에 따른 연성도 상관관계를 분석하고, 이를 바탕으로 변수를 선택하여 회귀분석을 수행 한 결과로, 식(3)을 심부구속철근량 산정식으로 제안한다. 제안식은 Table 2에 나타낸 바와 같이, 곡률연성도, 축력비, 콘크리트 압축강도, 축방향철근 항복강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근비 및 심부콘크리트 단면적에 대한 전체단면적의 비율을 변수로 한다.

$$\rho_s = 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \cdot \alpha \cdot \beta + \gamma \quad (3)$$

$$\alpha = \left[3(\mu_\phi + 1) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 0.8 \mu_\phi - 3.5 \right] \quad (4)$$

$$\beta = \left\{ \frac{f_y}{3,500} - 0.12 \right\} \quad (5)$$

$$\gamma = 0.1 (\rho_l - 0.01) \quad (6)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트 설계기준 압축강도 [kgf/cm^2]
f_{yh} : 심부구속철근 항복강도 [kgf/cm^2]
f_y : 축방향철근 항복강도 [kgf/cm^2]
A_g : 전체 단면적 [cm^2]
A_c : 심부콘크리트 단면적 [cm^2]
μ_ϕ : 곡률연성도 , P : 작용축력 [kgf]
ρ_l : 축방향철근비

소요연성도를 고려하는 식(3)의 제안식은 곡률연성도(μ_ϕ)를 하나의 변수로 채택하였다. 이는 변위연성도(μ_Δ)와 심부구속철근량(ρ_s)과의 상관관계를 직접 고려하는 경우, 단면 및 부재의 거동에 영향을 미치는 변수들의 영향을 동시에 고려해야 하기 때문에 관계식이 매우 복잡해지기 때문이다. 즉, 철근콘크리트 기둥의 연성은 단면을 구성하고 있는 여러 가지 변수들에 의해 곡률연성도에 영향을 미치며 이러한 단면특성에 따른 영향을 포함한 부재의 형상비 및 경계조건 등의 영향이 변위연성에 복합적으로 영향을 미친다.

따라서, 심부구속철근량과 연성도의 상관관계를 부재의 변위연성에 관한 함수로 나타낼 경우, 변위연성과 곡률연성의 상관관계에 따른 단면의 특성에 관한 변수를 직접적으로 포함하여야 하므로, 매우 복잡한 식의 형태를 나타내게 된다. 따라서, NZS 3101[18,19]과 Eurocode 8[15]에서도 소요심부구속철근량 산정식에 곡률연성도를 채택하고 있으며, 본 연구에서도 곡률연성도를 주요변수로 채택하여 심부구속철근량과 연성도의 상관관계식을 제안하였다. 이러한 경우에는 교각 단면의 연성능력(section ductility)을 나타내는 곡률연성도와 교각 부재의 연성능력(member ductility)을 나타내는 변위연성도의 관계식이 필요하게 되는데, 변위연성도와 곡률연성도의 상관관계는 손혁수 등[3,5]이 제안한 식(7)을 적용할 수 있다.

$$\mu_\Delta = 0.13 \left(1.1 + \frac{D}{L} \right) \mu_\phi + 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left(\frac{D}{L} \right) \right\} \quad (7)$$

변위연성도와 곡률연성도의 상관관계식인 식(7)에 대한 자세한 내용은 참고문헌 3과 5에 언급되어있다.

6. 제안식과 현행 설계기준식과의 비교

Fig. 10은 콘크리트 압축강도 240 kgf/cm^2, 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 3,000 kgf/cm^2, 축방향철근비 1 %인 경우에 대하여, 소요곡률연성도가 15인 경우 단면의 크기 및 축력비에 따른 소요심부구속철근량을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구의 제안식은 축력비가 증가할수록 소요심부구속철근량이 증가하는데 비하여, 현행 도로교설계기준(KDSHB(2000))의 심부구속철근량은 축력비와 무관하게 일정한 값을 나타낸다. 즉, 현행 도로교설계기준에 의한 심부구속철근량 산정식은 축력에 관한 변수를 고려하고 있지 않으므로, 축력이 상대적으로 높은 경우에는 비안전측인 설계결과를 제공할 수도 있을 것으로 판단된다.

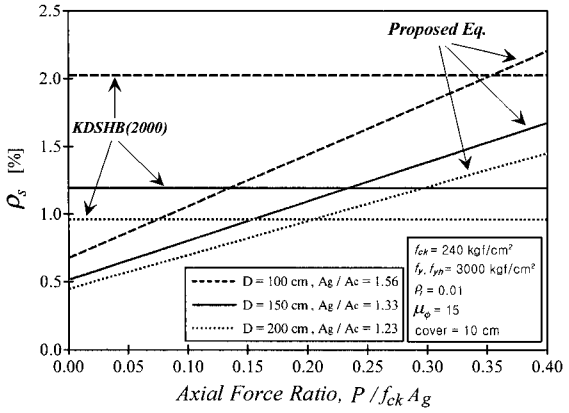


Fig. 10 Comparison of proposed equation to KDSHB (2000) (effects on dimension of section and axial force ratio)

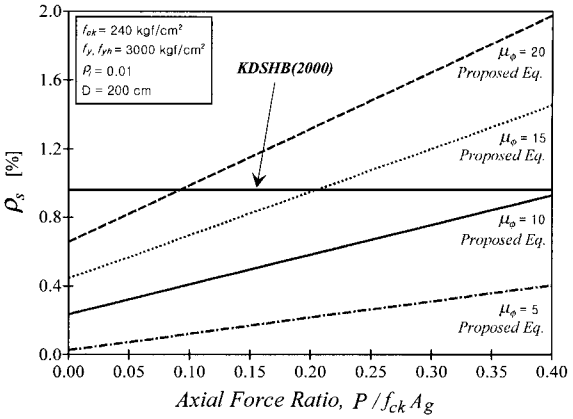


Fig. 11 Comparison of proposed equation to KDSHB (2000) for various curvature ductility demand

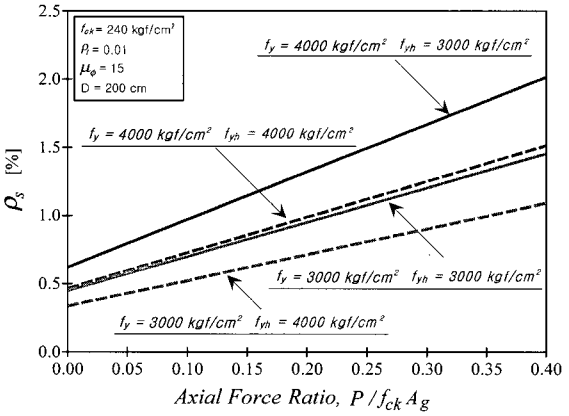


Fig. 12 Proposed equation for various yield strength of steel

Fig. 11은 단면지름 200 cm, 콘크리트 압축강도 240 kgf/cm^2, 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 3,000 kgf/cm^2, 축방향철근비 1 %인 경우의 소요곡률연성도에 따른 소요심부구속철근량을 나타낸 것으로서, 제안식을 사용한 경우 소요곡률연성도가 증가할수록 심부구속철근 요구량은 증가한다. 즉, 제안식은 소요곡률연성을 변수로 하여 교각에 요구되는 연성도에 따라 심부구속철근량을 결정하고 있으므로, 현행 도로교설계기준의 심부구속철근량 산정식보다 합리적일 것으로 판단된다.

Fig. 12는 단면지름 200 cm, 콘크리트 압축강도 240 kgf/cm^2, 축방향철근비 1 %, 소요곡률연성도 15인 경우에 대해 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도에 따른 심부구속철근량 제안식의 적용결과를 나타낸 것으로서, 축방향철근 항복강도가 동일한 경우 심부구속철근 항복강도가 클수록 소요심부구속철근량은 감소한다. 그러나, 심부구속철근 항복강도가 동일한 경우에는 축방향철근 항복강도가 클수록 소요심부구속철근량이 증가한다. 즉, 심부구속철근 항복강도가 크면 교각의 연성능력이 증가하여 소요심부구속철근량은 감소하지만, 축방향철근 항복강도가 크면 부재의 연성능력이 감소하게 되므로 소요심부구속철근량은 증가하게 된다.

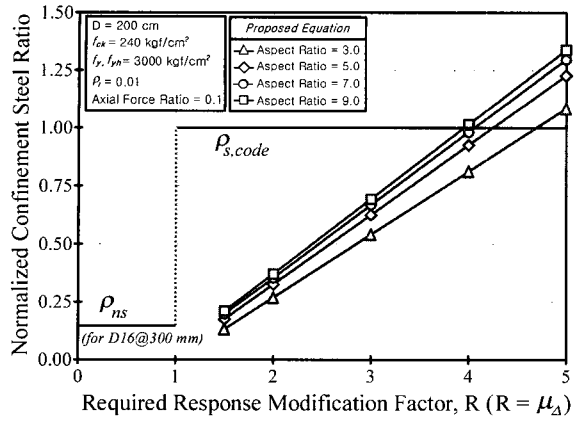
Fig. 12에서 축방향철근 및 심부구속철근의 항복강도가 동일한 경우(4,000 kgf/cm^2 또는 3,000 kgf/cm^2)에는 소요심부구속철근량이 거의 유사한 값을 나타내고 있는데, 이는 심부구속철근과 축방향철근의 항복강도가 연성에 미치는 영향이 복합적으로 작용하기 때문이다. 이와 같이 현행 도로교설계기준 및 외국 설계기준의 심부구속철근량 산정식은 축방향철근 항복강도의 영향을 고려하고 있지 않지만, 제안식은 이를 고려하고 있으며 합리적인 설계결과를 제공할 것으로 판단된다.

Fig. 13은 단면지름 200 cm, 콘크리트 압축강도 240 kgf/cm^2, 축방향철근 및 심부구속철근 항복강도 3,000 kgf/cm^2, 축방향철근비 1 %, 축력비 10 %로서 형상비가 각각 3, 5, 7, 9인 캔틸레버 교각에 대하여, 제안식의 소요심부구속철근량을 현행 설계기준식을 기준으로 한 비율로 나타낸 것이다. 이때 Fig. 13(a)는 식(8)[17]과 같은 동일변위원리(equal displacement principle)를 적용한 결과로서 장주기의 교각에 적용될 수 있으며, Fig. 13(b)는 식(9)[17]와 같은 동일에너지원리(equal energy principle)를 적용한 결과로서 단주기의 교각에 적용될 수 있다.

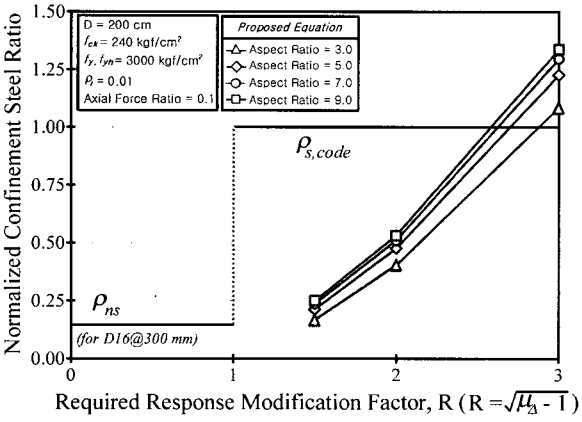
$$R = \mu_\Delta \tag{8}$$

$$R = \sqrt{2\mu_\Delta - 1} \tag{9}$$

Fig. 13에 보이는 바와 같이 현행 설계기준의 식은 교각의 형상비와 소요응답수정계수와는 무관하게 소요응답수정계수가 1.0을 초과하면 3.0(단주, 즉 single column의 경우) 이하의 범위에서 $\rho_{s,code}$의 심부구속철근량을 사용한다. 그러나, 이러한 개념은 강진지역의 완전연성거동을 확보하기 위한 것으로서 응답수정계수 R의 범위가 1.0 이상 3.0 이하인 경우, 즉 한정연성 구간에서는 교각의 소요연성도에 따라 심부구속철근량을 배근함으로써 합리적인



(a) for long period bridge columns



(b) for short period bridge columns

Fig. 13 Comparison of proposed equation to KDSHB (2000) considering various R factor

설계를 유도하며 과도한 횡방향철근의 사용으로 인한 시공성의 문제를 해결할 수 있을 것이다.

단, "연성도를 고려한 내진설계법"의 개발에 제안식을 적용하기 위해서는, 응답수정계수-변위연성도 관계식의 적용방법(동일변위원리와 동일에너지원리의 적용 기준), 제안식의 적용한계기준(심부구속철근량의 최대값, 또는 변위연성도 및 응답수정계수의 최대값), 비내진 횡방향철근량과의 연관성을 확보하기 위한 횡방향철근의 수직간격의 제한 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구는 철근콘크리트 교각 내진설계시 현행 실무에서 당면하고 있는 심부구속철근량 산정에 관한 문제점을 해결하고 연성도를 고려한 합리적인 철근콘크리트 교각의 내진설계방법을 제안하기 위해 수행된 연구로서, 철근콘크리트 교각의 내진거동에 영향을 미치는 변수들을 조합한 총 7,200개의 철근콘크리트 교각을 선정하고 비선형해석을 수행하여 심부구속철근량과 변위연성도의 상관관계를 분석하였다. 이 분석결과를 바탕으로, 곡률연성도, 축력비, 콘크리트 압축강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근 항복강도, 축방향철근비 및 심부콘크리트 단면적에 대한 전체단면적의 비율을 변수로 하여, 소요연성도에 대한 소요심부구속철근량 산정식을 제안하였다. 이를 통하여 보다 합리적으로 안전성과 경제성을 고려할 수 있는 철근콘크리트 교각의 내진설계법을 개발하기 위한 연구자료를 제공함으로써 구조물의 중요도 및 소요연성도에 따른 효율적인 설계법의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

단, 철근콘크리트 교각에 대한 새로운 내진설계법인 "연성도를 고려한 내진설계법"을 완성하기 위해서는, 응답수정계수-변위연성도 관계식의 적용방법(동일변위원리와 동일에너지원리의 적용 기준), 제안식의 적용한계기준(심부구속철근량의 최대값 또는 변위연성도 및 응답수정계수의 최대값), 비내진 횡방향철근량과의 연관성을 확보하기 위한 횡방향철근의 수직간격의 제한 등의 추가 연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

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

단위 환산

1 kgf/cm^2 = 0.098067 MPa ≈ 0.1 MPa
1 MPa = 10.1972 kgf/cm^2 ≈ 10 kgf/cm^2

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준. 2000.
2. 박종협, 조창백, 박희상, 정영수, "중·약진지역의 원형 내진 RC교각의 내진성능평가", 2000년도 봄학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제12권, 1호, 2000. 5, pp.452~457.
3. 손혁수, "심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구," 박사학위논문, 영남대학교, 2002. 6.
4. 손혁수, 이재훈, "철근콘크리트 교각의 연성도 평가를 위한 비선형해석", 한국지진공학회논문집, 제7권, 제4호, 2003. 8, pp.39~49.
5. 손혁수, 이재훈, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 연성도 상관관계", 한국지진공학회논문집, 제7권, 제4호, 2003. 8, pp.51~61.
6. 이재훈, 김광수, 배성용, "지진하중에 대한 고강도콘크리트 나선철근교각의 한정연성거동", 대한토목학회논문집, 제23권, 3-A호, 2003. 5, pp.385~395.

7. 이재훈, 배성용, 윤석구, "나선철근교각의 내진성능실험", 대한토목학회논문집, 제21권, 1-A호, 2001. 1, pp.109~121.
8. 이재훈, 손혁수, 배성용, 박찬민, "서해대교 PSM교 교각의 내진성능", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제3호, 2000. 9, pp.67~81.
9. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험. 한국지진공학회논문집. 한국지진공학회, 제3권, 제2호, 1999, pp.55~65.
10. AASHTO, "*Standard Specifications for Highway Bridges*," American Association of State Highway and Transportation Officials, 16-th edition, Washington, D.C., USA, 1995.
11. AASHTO, "*LRFD, Bridge Design Specifications*," American Association of State Highway and Transportaion Officials, 1st edition, Washington, D.C., USA, 1994.
12. AASHTO, "*LRFD. Bridge Design Specifications*," American Association of State Highway and Transportaion Officials, 2nd edition, Washington, D.C., USA, 1998.
13. ATC-32, "*Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations*," Applied Technology Council, California, USA, 1996.
14. CALTRANS, "*Bridge Design Specifications*," California Department of Transportation, Sacramento, 1993.
15. Eurocode 8 Part 2, "*Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*," European Committee for Standardization, 1996.
16. Mander, J. B., Priestley M. J. N., and Park R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 114, No. 8, 1988, pp.1804~1826.
17. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Earthquake Spectra and Design," Engineering Monograph, *Earthquake Engineering Research Institute*, Berkeley, California, 1982.
18. New Zealand Standard, "*Concrete Structures Standard - Part 1 : Design of Concrete Structures*," NZS 3101, 1995.
19. New Zealand Standard, "*Concrete Structures Standard - Part 2 : Commentary on the Design of Concrete Structures*," NZS 3101, 1995.
20. Priestley, M. J. N. and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 1, 1987, pp.69~76.
21. Priestley M. J. N., Seible F., and Calvi G. M., "*Seismic Design and Retrofit of Bridges*," Wiley, New York, 1996.
22. Watson, S., Zahn, F. A., and Park, R., "Confining Reinforcement for Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, 1994, pp.1798~1824.
23. Wehbe, N., Saiidi, M., Sanders, D., and Douglas, B., "*Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Bridge Columns with Moderate Confinement*," Technical Report NCEER-96-0003, NCEER, State University of New York at Buffalo, 1996.

요 약

본 연구는 철근콘크리트 교각에 대한 새로운 내진설계법을 개발하기 위한 연구의 일환으로서, 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 연성도와 심부구속철근량의 상관관계를 분석하고 설계식을 제시함을 목적으로 한다. 이를 위하여, 반복하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 횡하중-변위 포락곡선 실험결과를 비교적 정확하게 예측하며, 특히 변형능력 및 연성도에 대하여는 실험결과에 비하여 안전측의 결과를 제공하는 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용하였다. 해석의 대상 교각으로는, 단면지름, 형상비, 콘크리트 강도, 축방향철근 항복강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근비, 축력비, 심부구속철근비 등을 주요변수로 하여, 총 7,200개의 철근콘크리트 나선철근 기둥 모델을 채택하였다. 해석결과 자료를 대상으로 상관관계를 분석하여 소요연성도에 따른 심부구속철근량의 새로운 설계식을 제안하였으며, 이 식은 연성도에 기초한 철근콘크리트 교각의 새로운 내진설계법에 적용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 철근콘크리트 교각, 내진설계, 심부구속철근량, 소요연성도, 설계제안식