

철근콘크리트 교각 심부구속철근량의 비교연구 Comparative Study on Confinement Steel Amount of RC Column Bent

이재훈*

배성용**

손혁수**

Lee, Jae-Hoon Bae, Sung-Yong Son, Hyeok-Soo

ABSTRACT

Recently there have been many destructive seismic events in Kobe, Japan in 1995 and in Northridge, California, USA in 1994, etc. The Korean Bridge Design Standard Specifications adopted the seismic design requirements in 1992. Comparing the earthquake magnitude in Korea with those in the west coast of the USA, it may be said that the current seismic design requirements of the Korean Bridge Design Standard Specifications provides too conservative design results especially for transverse reinforcement details and amount in reinforced concrete columns. This fact usually makes construction problems in concrete casting due to transverse reinforcement congestion. And the effective stiffness I_{eff} depends on the axial load $P/(A_g f_{ck})$ and the longitudinal reinforcement ratio A_{st}/A_g and it is conservative to use the effective stiffness I_{eff} than the gross section moment I_g . Seismic design for transverse reinforcement content of concrete column is considered of extreme-fiber compression strain, R-factor, axial load and stiffness etc.

1. 서 론

최근 1995년의 일본 고베 지진과 1994년 미국 캘리포니아 노드리지 지진 등 몇 차례의 큰 지진에 의한 피해사례가 발생함에 따라 지진에 대한 구조물의 안전성 확보가 요구되어지고 있는 실정이다. 국내의 경우에는 아직까지 지진에 의한 큰 피해사례는 보고된 바 없지만, 최근의 지진 이력사항을 살펴볼 때 앞으로 지진활동이 활성화될 가능성이 있다고 보고 되고 있다. 따라서, 국내에서도 1992년 개정된 도로교표준시방서에 내진설계편이 신설됨에 따라 교량에 대한 내진설계가 이루어지고 있다. 그러나 현행 도로교표준시방서(1996)의 내진설계 규준^[1]은 강진의 경우에 대한 미국의 시방규준을 반영한 설계지침이라고 할 수 있는데, 이에 따라 설계된 교각은 횡구속 철근의 상세 등으로 인하여 시공이 매우 어려운 실정이다. 과도한 횡방향철근량으로 인하여 현장에서의 콘크리트타설이 문제가 되고 있으며, 이로 인하여 콘크리트의 품질관리가 나빠지게 되어 교각의 콘크리트성능을 오히려 저하시키고 결국 구조물의 수명을 단축시키는 문제점이 제기되고 있다. 반복하중과 같은 지진하중이 가해지는 교각의 소성힌지 부분에서 콘크리트 다짐이 불량할 때에는 콘크리트의 응력상태가 집중되어 구조물의 강성저하를 초래할 수 있으므로 적절한 횡방향

* 영남대학교 토목공학과 조교수, 정희원

** 영남대학교 토목공학과 박사과정

철근량을 산출하여 구조물이 충분한 연성과 강성을 가질 수 있도록 하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 국내의 시방규준과 외국의 시방규준들의 비교 분석과 설계결과의 비교분석을 통하여 심부구속 철근량의 산정에 영향을 미치는 인자를 파악하고자 한다.

2. 설계기준 비교

2.1 철근콘크리트기둥의 설계강도

국내의 도로교표준시방서에서는 기둥의 설계강도 계산시 등가직사각형 응력분포를 사용하고 있다. 설계강도 계산시 사용되는 콘크리트 강도는 재령 28일 강도를 기준으로 하고 있으며, 극한상태의 콘크리트 압축연단 변형률은 0.003을 사용하고 있다. 철근의 항복강도는 기존 제품의 KSD 3504에서 요구되는 최소의 항복강도를 사용하고 있다.^[2,3] ATC-32에서도 기둥의 설계강도 계산시 등가직사각형 응력분포를 이용하고 있으나, 콘크리트 강도는 실제 배합강도 및 장기강도 등을 고려하여 설계강도를 재령 28일 강도에 1.3배를 곱하여 높게 평가하여 사용하고 있으며 극한상태의 콘크리트 압축연단 변형률로서 0.004를 적용하고 있다. 또한 철근의 경우에는 항복강도의 1.1배의 값을 사용하고 있다.^[4] EC 8에서는 작용하중과 재료강도 등은 많은 요소에 의해 변동하므로 각각 재료의 부분안전계수를 적용한 한계상태설계법에 따라 기둥의 설계강도를 계산하고 있다. 재료의 부분안전계수는 콘크리트의 경우 1.5로 나는 값을 사용하고, 극한상태의 콘크리트 압축연단 변형률은 0.0035를 사용하며, 철근의 경우 부분안전계수는 콘크리트 보다 품질변동이 적기 때문에 1.15로 나는 값을 사용하고 있다.^[5] 강도설계법의 강도감소계수는 '99도로교설계기준(안)에서는 나선철근 기둥의 경우 0.75, 띠철근 기둥의 경우 0.70을 적용하고 있다. ATC-32규정에서 상시하중에 대한 기둥의 강도감소계수는 나선철근 기둥 및 원형띠철근 기둥에 대해서 0.75를 적용하고 있으며, 사각형띠철근 기둥의 강도감소계수는 0.70을 적용하고 있는 반면에, 지진하중을 받는 내진기둥에서의(Group VII) 강도감소계수는 1.0을 적용하고 있다. 그러나 국내에서는 일반적으로 원형띠철근 기둥에 대해서도 사각형띠철근 기둥과 같은 강도감소계수를 적용하고 있으며, 원형띠철근의 철근상세에 따라 나선철근 기둥과 동일한 거동을 나타낸다면 동일한 강도감소계수를 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다. 시방서에 따른 재료상수 및 강도감소계수의 차이를 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 재료상수, 설계개념 및 강도감소계수의 비교

구 분	'99 도로교설계기준(안)	EC 8	ATC-32
콘크리트설계 압축강도	f_{ck}	$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1.5}$	$f_{ce}' = 1.3f_{ck}$
철근설계 항복강도	f_y	$f_{yd} = \frac{f_y}{1.15}$	$f_{ye} = 1.1f_{yk}$
극한변형률 ϵ_{cu}	0.003	0.0035	0.004
ϕP_n	$0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y$	-	$0.5[0.85f_{ce}'(A_g - A_{st}) + A_{st}f_{ye}]$
설계개념	강도설계법 : 강도감소계수 띠 철 근 : 0.70 나선철근 : 0.75	한계상태설계법	강도설계법 : 강도감소계수

2.2 횡방향철근 요구량

지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 기둥이나 교량 교각에서의 소성힌지 영역에서는 콘크리트 코어부분의 구속효과를 증대시키고 축방향철근의 좌굴을 방지하며, 특히 구조물의 충분한

연성을 확보하기 위해 적절한 횡방향철근을 배근하여야 한다. 표 2.2는 각국의 설계기준별 횡방향 철근량 산출식을 비교하여 나타낸 것이다. '99 도로교설계기준(안)은 축력의 영향을 고려하지 않은 반면에 EC 8 및 ATC-32는 횡방향 철근량을 축력의 정도에 따라 구분하고 있으며, 적절한 강도 및 연성을 확보하는 데 합리적인 평가를 하고 있다.^[3,4,5]

표 2.2 설계기준별 횡철근산출식 비교

구 분		횡철근량 산출식
사각 띠철근	'99도로교설계 기준(안)	$A_{sh} = 0.30 s h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right]$ 또는 $A_{sh} = 0.12 s h_c \frac{f_{ck}}{f_y}$
	EC 8	$\omega_{wd,c} = 1.40 \omega_{wd,r}$ $\omega_{wd,r} = 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.07 \geq \omega_{w,min}$ 연성거동(ductile behavior)의 경우, $\mu_c = 13$ $\omega_{w,min} = 0.12$ 한정연성거동(limited ductile)의 경우, $\mu_c = 7$ $\omega_{w,min} = 0.8$
	ATC-32	$A_{sh} = 0.12 s h_c \frac{f_{ce}'}{f_{ye}} \left[0.5 + \frac{1.25 P_e}{f_{ce}' A_g} \right] + 0.13 s h_c (\rho_l - 0.01)$
나선철근 및 원형후프	'99도로교설계 기준(안)	$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$ 또는 $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$
	EC 8	$\omega_{wd,c} = 1.40 \omega_{wd,r}$ $\omega_{wd,r} = 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.07 \geq \omega_{w,min}$ 연성거동(ductile behavior)의 경우, $\mu_c = 13$ $\omega_{w,min} = 0.12$ 한정연성거동(limited ductile)의 경우, $\mu_c = 7$ $\omega_{w,min} = 0.8$
	ATC-32	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{ce}'}{f_{ye}} \left[0.5 + \frac{1.25 P_e}{f_{ce}' A_g} \right] + 0.13 (\rho_l - 0.01)$

2.3 지진해석시의 기둥의 강성

철근콘크리트 교각 내진설계시의 부재강성으로는, 1996년도 도로교표준시방서나 1999년도 도로교설계기준(안)에 이에 대한 명확한 규준이 없으므로, 국내에서는 전단면강성 I_g 를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 지진하중작용에 의하여 기둥에 소성힌지가 발생하여 응답수정계수 R을 적용하는 경우, 그림 2.1에 보이는 바와 같이 소성힌지가 발생하는 단면의 최외곽 인장철근이 항복하는 점을 연결한 기둥의 유효강성 I_{eff} 를 사용하는 것이 합리적이다. 전단면강성 I_g 는 기둥 전길이에 걸쳐 균열이 전혀 발생하지 않은 초기강성을 의미하는 것으로, 엄밀하게는 I_g 를 사용하는 것이 철근콘크리트 기둥의 비선형 거동을 고려해 볼 때 합리적이지 못하지만, 단면력을 계산할 때는 안전측의 결과를 제공한다.

이와 같은 거동을 고려하여 EC8과 ATC-32는 다음과 같이 부재강성에 대하여 규정하고 있다.

▶ Eurocode 8-Part 2

- (1) 유효강성(effective stiffness) 사용 : 모멘트-곡률 곡선상의 이론적
철근항복점에 해당하는 강성(secant) 사용
- (2) 연성거동(ductile behavior) 교량의 경우, Annex C 참조

(3) 한정연성거동(limited ductile behavior) 교량의 경우, I_g 사용

• Annex C2 : $I_{eff} = 0.08 I_g + I_{cr}$, $I_{cr} = \frac{M_y}{E \varphi_y}$

• Annex C3 : $E_c I_{eff} = \frac{\nu M_{Rd}}{\varphi_y}$ $\nu = 1.2$ $\varphi_y = \frac{\epsilon_{sy} - \epsilon_{cy}}{d}$ $M_{Rd} = \text{설계강도}$

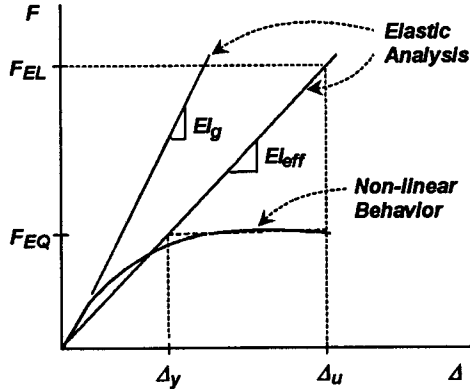


그림 2.1 철근콘크리트 기둥의 비선형 거동 및 유효강성

▶ ATC-32

- (1) 균열과 철근슬립의 영향을 고려한 유효강성(effective stiffness) 사용
- (2) 기둥들의 길이와 단면이 거의 같은 경우 : 유효강성으로 균열단면의 강성 사용

$$I_{eff} = I_{cr}' \approx 0.5 I_g$$

- (3) 각 기둥의 길이와 단면이 다른 경우 :
철근비와 축력비율을 변수로 하여 작성한 유효강성 도표 사용
- (4) 상부구조 : 철근콘크리트 $I_{eff} = 0.75 I_g$ 프리스트레스트 콘크리트 $I_{eff} = I_g$

그림 2.2는 철근콘크리트 기둥의 재료 비선형해석을 통하여 얻은 균열의 발생 및 분포를 고려한 유효강성을 나타내는데, SD 40 철근을 사용할 때 축방향철근비가 2 % 이고 축력비율이 0.15

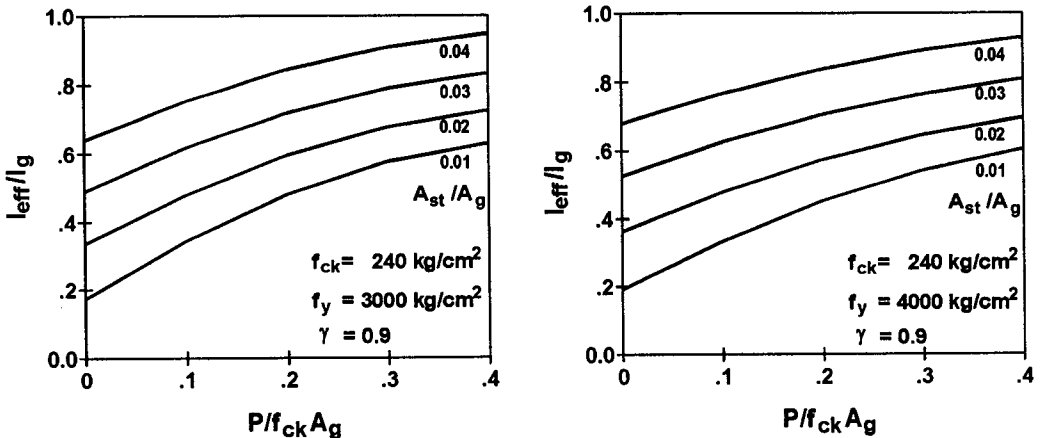


그림 2.2 철근콘크리트교각의 축력에 따른 유효강성(원형단면)

이하인 경우와 축방향철근비가 1% 이고 축력비율이 0.3 이하인 경우에는 소성힌지의 형성여부와 관계없이 $0.5 I_g$ 를 기둥의 유효강성 I_{eff} 로 사용하여도 안전축일 것이다.^[7,8] 한편, 안전축의 단면력을 얻고자 할 때에는 유효강성 I_{eff} 대신 전단면강성 I_g 를 사용하여도 좋으나, 변위를 구하고자 하는 구조해석에서는 실제보다 작은 변위를 얻게 된다는 사실을 유의하여야 한다. 1996년도 도로교표준시방서나 1999년도 도로교설계기준(안)에는 이에 대한 명확한 기준이 없으나, 앞에서 언급한 바와 같이 철근콘크리트 교각 설계시의 구조해석에서는 균열의 영향을 고려하여 부재강성을 결정하여야 하며, 내진설계시에는 균열의 영향과 함께 기둥의 철근항복을 고려하여 유효기둥강성을 사용하는 것이 합리적이다.

2.4 응답수정계수

응답수정계수는 철근콘크리트기둥의 내진설계시, 정적 또는 동적 구조해석의 방법으로 선형탄성해석을 사용하는 경우에 적용하는 수정계수이다. 즉, 재료 및 단면성질에 의하여 비선형기둥을 보이는 철근콘크리트 기둥에 대하여 선형탄성해석을 수행함으로써 발생하는 차이를 수정하기 위한 계수이다. 도로교표준시방서는 단주(single column)에 대한 응답수정계수로 3을 적용하며, 다주(multiple bent)에 대한 응답수정계수로는 5를 사용하고 있다. EC 8 part 2(교량설계)에서 연성거동의 경우 최대 3.5와 한계연성거동의 경우 최대 1.5를 채택하고 있으며, ATC-32는 주기가 길 때 응답수정계수를 4로 채택하고 있다.

3. 각 설계기준에 따른 교각설계

3.1 설계방법

2장에서 언급한 각 설계기준에 따라 3.2의 설계조건에 대하여 교각을 설계하여 설계결과를 비교 분석하였다. 단면설계시 각각 시방서에 규정하고 있는 표 3.1과 같은 강성값과 응답수정계수를 적용하여 단면을 설계하였으며, 교각의 단면형상은 정사각형과 원형기둥으로 하여 최적의 단면을 설계하여 교각의 단면적, 축방향철근량 및 횡방향철근량을 비교 분석하고자 한다. 설계단면의 축방향철근비는 0.012로 고정하여 각각 단면을 결정후, 횡방향철근비를 단위길이당 체적비로 환산하여 나타냈다. '99 도로교설계기준(안)에 따른 구조설계시 부재강성을 전단면강성(I_g)과 $0.5I_g$ 의 유효강성(I_{eff})을 사용하였다.

표 3.1 설계시 적용된 유효강성 및 응답수정계수

구 분		교각강성(I)	응답수정계수(R)
사각띠철근 및 나선철근	'99	$I_{eff} = I_g$	3.0
	도로교설계기준(안)	$I_{eff} = 0.5I_g$	3.0
	EC 8	$I_{eff} = 0.5I_g$	3.5
	ATC-32	$I_{eff} = 0.5I_g$	4.0

3.2 설계조건

- 1) 교량의 경간은 2경간이며 지간의 길이는 50m, 교각의 형식은 T형교각으로 높이는 10m로 가정한다.
- 2) 종방향 단위하중은 $w(x) = 30 \text{ t/m}$ 이며, 상부구조물의 중량은 $W = w(x) * L = 3,000 \text{ ton}$ 으로 하

고 교축방향으로만 설계를 하였다. 재료의 강도는 콘크리트압축강도는 $f_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 철근의 항복강도는 $f_y = 3,000 \text{ kg/cm}^2$ 이형철근을 사용하고 있다. 교각의 축력은 $P = 1,200 \text{ ton}$ 이 작용하고 있다.

- 3) 내진등급은 1등급으로 지진구역계수는 0.11이며, 위험도계수(I)는 1.4이므로 최대지반가속도 산정을 위한 가속도계수(A)는 0.154이다. 지반의 조건은 Type II로 가정하여, 지반계수(S)로 1.2를 사용한다.

3.3 설계결과의 비교

전단면강성 I_g 를 사용한 단면설계는 등가정적지진하중($P_e(x)$)를 크게 평가하여 설계지진모멘트를 증가시켜 안전성을 확보하기 위해서는 다소 큰 단면적이 요구된다. EC 8, ATC-32에서도 구조물의 균열을 고려한 유효강성을 적용하여 합리적인 단면설계를 하고 있다. 또한 응답수정계수는 탄성해석에 의하여 구한 단면력을 소성거동을 할 수 있도록 지진력을 산정하는 계수로써 EC8, ATC-32에서는 '99 도로교설계기준(안)에서는 3.0을 적용하고 있는 반면에 각각 3.5, 4.0을 적용하며, 충분한 소성거동을 하는 것으로 간주하여 설계모멘트를 낮게 평가하여 단면을 적게 설계하고 있다. 그림 3.1과 3.2는 정사각형 및 원형기둥에 대한 각각 시방서 규정에 따라 축력-모멘트 설계강도를 해석한 결과를 나타낸 것이며 ATC-32에 따라 해석결과는 '99 도로교설계기준(안)에서 유효강성과 응답수정계수($R=3.0$)을 적용한 것 보다 상당히 낮게 평가하고 있다. 국내에서는 일반적으로 단면설계시 전단면강성을 사용하여 너무 안전측으로 설계하고 있는 것으로 분석된다.^[9] 따라서 단면이 과대해지면 축방향철근 및 횡방향철근이 증가하여 철근배근을 할 때 어려움이 있으며, 밀집한 횡방향철근으로 인하여 오히려 콘크리트의 품질관리에 문제를 야기시킨다. 시방서 별 설계결과를 표 3.2와 3.3에서 나타낸바와 같이 ATC-32규정에서는 축방향철근량과 횡방향철근량이 다른 규정보다 상당히 낮게 설계되고 있음을 판단할 수 있다. '99 도로교설계기준(안), EC8 및 ATC-32에 의해 그림 3.1 및 3.2와 같이 비교분석하면, 안전측의 단면력을 얻고자 할 때에는 유효강성 I_{eff} 대신 전단면강성 I_g 를 사용해도 무방하나, 변위를 구하고자하는 구조해석에서는 실제보다 작은 변위를 얻으므로 유효강성 I_{eff} 대신 전단면강성 I_g 를 사용하면 설계지진력이 증가한다. 단면의 강성값과 응답수정계수에 의해 설계지진모멘트가 결정되므로 설계지진모멘트를 저항할 수 있는 단면의 축방향철근과 횡방향철근량은 단면크기가 작아지면 감소하는 경향을 나타내고 있다. 정사각형 및 원형기둥에 관한 설계 예제에서의 실제 배근되는 심부구속체적량을 보면 ATC-32가 가장 적게 배근되고 있다.

표 3.2 정사각형기둥의 설계결과

구 분	강성 I_{eff}	설계지진 모멘트 [ton-m]	단면제원 (단면적) [cm^2]	축방향 철근량 [cm^2]	심부구속 체적철근비 [cm^3]	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$	비고*
'99 도로교설계기준(안)	I_g	2,666	240x240 (57,600)	691.2	0.0194 (100,447)	0.09	100 %
	$0.5I_g$	1,712	200x200 (40,000)	480.0	0.0194 (68,386)	0.13	68 %
Eurocode 8	$0.5I_g$	1,337	176x176 (30,976)	371.7	0.0149 (39,942)	0.16	40 %
ATC-32 Report	$0.5I_g$	994	139x139 (19,321)	232.0	0.0178 (28,608)	0.26	29 %

* 심부구속 철근량의 비율

표 3.3 원형기둥의 설계결과

구 분	강성 I_{eff}	설계지진 모멘트 [ton-m]	단면제원 (단면적) [cm ²]	축방향 철근량 [cm ²]	심부구속 체적철근비 [cm ³]	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$	비고*
'99 도로교설계기준(안)	I_g	2,619	270 (57,256)	687.1	0.0096 (50,819)	0.09	100 %
	$0.5 I_g$	1,726	230 (41,548)	498.6	0.0096 (36,877)	0.12	73 %
Eurocode 8	$0.5 I_g$	1,399	210 (36,636)	415.6	0.0103 (32,984)	0.14	65 %
ATC-32 Report	$0.5 I_g$	996	160 (20,106)	241.3	0.0114 (21,192)	0.25	42 %

* 심부구속 철근량의 비율

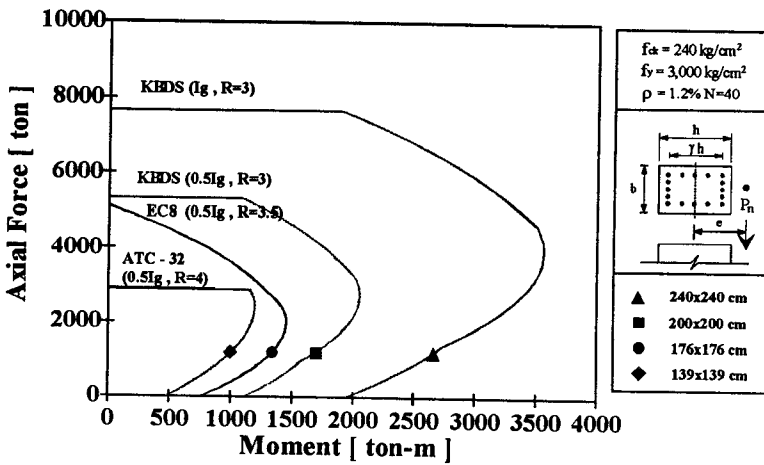


그림 3.1 정사각형기둥의 축력-모멘트 설계강도 해석

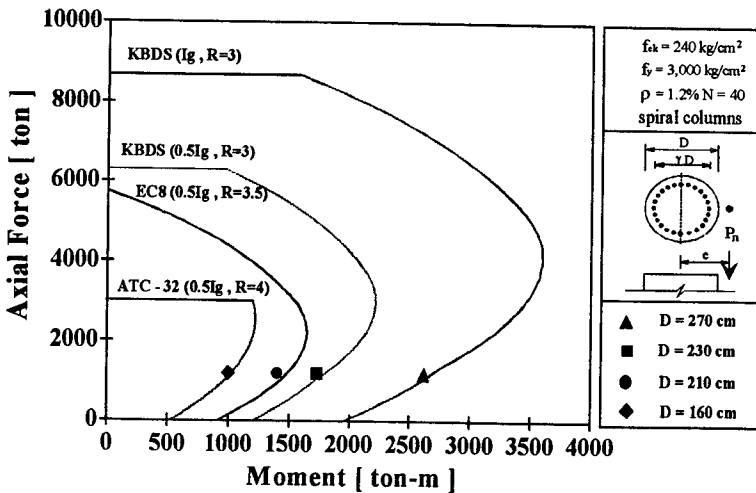


그림 3.2 원형기둥의 축력-모멘트 설계강도 해석

4. 결 론

내진상세를 가진 교량의 교각에 소성설계지진력을 산정할 때, 고려한 변수들의 영향에 관하여 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 지진하중과 같은 짧은시간에 하중을 받는 구조물의 실제강도는 설계강도 보다 크기 때문에 ATC-32와 같이 재료의 강도를 증가시키고 강도감소계수로 1.0을 적용하는 것이 경제적이고 합리적인 설계결과를 유도할 수 있다.
- 2) 횡방향철근량의 계산시 국내 설계기준에서는 축력의 영향을 고려하지 않고 있으므로 EC 8과 ATC-32와 같이 축력의 영향을 고려하여 산정하는 것이 보다 합리적인 설계결과를 유도할 수 있으며, 횡방향철근량 요구량의 계산식에 대한 검토 및 연구가 필요하다.
- 3) 국내 교각 내진설계시의 부재강성은 전단면강성을 사용하는 것이 일반적이거나 구조물의 거동 및 응답수정계수 적용의 개념에 따라 유효강성을 사용하는 것이 합리적이며, 경제적인 설계결과를 유도할수 있다.
- 4) 심부구속철근량의 설계에 영향을 주는 인자로는 재료강도, 강도감소계수, 부재강성, 횡방향철근량의 산정식 및 응답수정계수등이 복합적으로 영향을 미치므로 경제성 및 안정성을 확보하는 설계기준의 개발을 위해서는 종합적인 검토 및 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 대한토목학회, "도로교표준시방서", 1996.
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준(안)", 1999.
3. 한국도로교통협회, 지진공학연구센터, "도로교설계기준(안)", 1999.
4. ATC 32, "Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations," *Applied Technology Council*, California, USA, 1996.
5. Eurocode 8 Part 2, "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges," *European Committee for Standardization*, 1996.
6. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges," *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 16-th edition, Washington, D.C., USA, 1995.
7. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
8. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992.
9. 이재훈, "철근콘크리트 교각의 내진설계 예제 및 해설", 한국도로공사 세미나, 1999. 2.