



## 변위연성도 기반 철근콘크리트 교각의 한정연성 내진 설계법과 성능평가 방법

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

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

## Limited-Ductile Seismic Design and Performance Assessment Method of RC Bridge Piers Based on Displacement Ductility

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

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

<sup>2)</sup>Dept. of Civil, Gyeongdo Provincial College, Yechon 757-807, Koera

**ABSTRACT** Until recently Korea is considered to be immune from the earthquake hazard because it is located far away from the active fault. However, we have noticed that recent strong earthquakes inflicted enormous losses on human lives and nation's economy all over the world. Hence, there has been raised the importance of the earthquake resistant design for various infrastructures. In this research, new methodologies for the seismic design and performance assessment of reinforced concrete (RC) bridge pier were proposed from experimental results of 82 circular RC bridge piers and 54 rectangular RC bridge piers tested in domestic and aboard. New seismic design method was based on the concept of the limited ductile design, which could be practically used for low or moderate seismic regions like Korea. Further study for the seismic safety of RC bridge piers was carried out to enhance the seismic performance of aged RC bridge piers, which were designed and constructed before implementing the 1992 seismic design provision in Korea. New formula for the seismic performance assessment of RC bridge piers was proposed and practically used for the decision on the need of repair and retrofit of many aged RC bridge piers.

**Keywords** RC bridge pier, limited ductile seismic design, seismic performance evaluation

### 1. 서 론

철근콘크리트 교각이 지진하중에 견딜 수 있도록 하는 내진설계 방법에는 구조물의 강성을 증가시켜 지진하중에 대한 저항능력을 증가시키는 방법과 구조물에 연성을 부여함으로써 지진에 의한 피해를 최소화하는 방법으로 구분되며 이중 후자인 연성능력을 증가시키는 방법을 현행 내진설계에서 사용하고 있다. 그 이유는 구조물의 사용연한 동안에 발생할 확률이 매우 적은 지진에 대해서 탄성한도로 저항할 경우 매우 비경제적인 설계가 되기 때문에, 현행 내진설계에서는 지진하중에 대하여 구조물의 항복은 허용하되 항복 후에 취성파괴가 아닌 연성과괴를 유도하기 위함이다. 따라서 철근콘크리트 교각의 내진성능은 변위연성도, 곡률연성도, 에너지 흡수능력 등 여러 가지 방안으로 표현되어지고 있으며, 주로 변위연성도에 의하여 평가 및 설계되어지고 있다. 정영수<sup>1)</sup>는 지진을 경험한 형상비 2.5의 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 수행하였으며, 주철근 겹침이음이 있는 경우

의 변위 및 곡률연성도가 주철근 겹침이음이 없는 경우보다 적게 나타났으며 이를 섬유보강시 변위 및 곡률연성도가 현저히 증가한다고 보고하였다. 이재훈<sup>2)</sup>은 원형 나선 철근콘크리트 교각에 대한 실험 연구로부터 현 도로교설계기준의 심부구속철근 배근구간의 규정은 축력비가 0.2 이상인 경우에 비안전측의 설계가 될 수 있으므로 축력을 고려한 규정으로 수정 제안하였다. 박창규<sup>3,4)</sup>는 원형 및 사각단면 철근콘크리트 교각에 대한 국내외 실험 결과로부터 내진성능에 영향을 미치는 주요 인자를 분석한 후, 현행 도로교설계기준의 심부구속철근비 산정식에 축하중비와 주철근비를 포함하는 새로운 심부구속철근비 산정식을 제안하였다. 김태훈<sup>5)</sup>은 비선형 유한요소해석 기법을 이용하여 철근콘크리트 교각의 지진 손상도를 평가하였다. 이대형<sup>6)</sup>은 Macro 모델을 이용하여 섬유보강된 주철근이 겹침이음이 있는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하였다. 손혁수<sup>7)</sup>는 비선형 해석프로그램을 이용하여 다양한 상세에 따른 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하였으며, 그 결과로부터 요구곡률연성도에 따른 심부구속철근비 산정식을 제안하였다. 한편, Wehbe 등<sup>8)</sup>은 중저진 지역에서의 철근콘크리트 기둥과 벽체의 철근상세 개발을 위한 한정연성 횡구속근을 갖는

\*Corresponding author E-mail : pcg2213@hdec.co.kr

Received April 5, 2006, Accepted August 30, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

직사각형 철근콘크리트 기둥의 거동 및 연성도를 평가하였다. 4개의 1/2 축소 교량 교각의 횡방향 철근비는 AASHTO에서 요구된 최소 횡방향 철근량의 46~60% 정도로 설계되었다. 실험은 10%~25% 범위의 일정한 축하중 하에서 준정적실험을 수행하였으며, 실험체의 변위연성도는 5.0~7.0의 범위로 조사되었다. 해석 및 실험 결과에 기초하여 목표 변위연성도를 위한 횡구속 철근설계 방안을 제시하였다.

이상의 철근콘크리트 교각에 대한 국내·외의 많은 실험 및 해석 연구와 우리나라의 지진규모를 감안하면 현행 AASHTO<sup>9)</sup> 규정을 도입한 완전연성개념의 내진설계보다는 한정연성개념 설계법을 도입하는 것이 우리나라를 포함하는 중저진 지역에 바람직하다고 할 수 있다. 또한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가도 실험 및 해석에 의하여 이루어지고 있으나 모두 시간과 노력이 많이 필요로 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 그 동안 이루어진 철근콘크리트 교각에 대한 국내·외의 실험 연구 결과로부터 한정연성설계법을 도입하기 위한 주철근 겹침이음이 없는 경우의 요구변위연성도에 따른 심부구속 철근비 산정식과 간편하게 내진성능을 파악할 수 있는 내진성능평가식을 제안하였다.

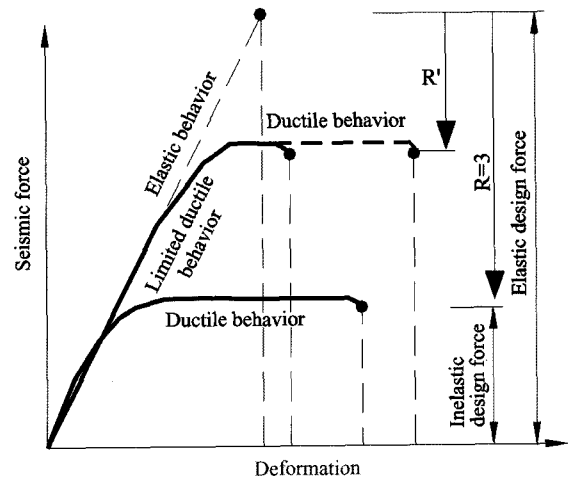
## 2. 한정연성설계를 위한 응답수정계수

우리나라 도로교설계기준 및 세계 각국의 내진설계 개념도 교각의 내진 설계시 충분한 연성을 확보하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 어느 정도의 연성능력을 확보해야 하는지, 즉 요구연성기준은 각 설계기준마다 다르게 규정하고 있다. Eurocode 8<sup>10)</sup> 및 NZS3101<sup>11)</sup>에서는 요구 곡률연성도로 규정하고 있으나 우리나라에서는 요구연성기준이 명시되어 있지 않다. 다만, 지진시 교각의 탄성거동 보다는 소성거동을 유도하기 위하여 응답수정계수의 값으로서 단주(single column)의 경우는 3, 다주(multi column bent)의 경우는 5를 도입하여 소성설계를 하고 있다. 즉, 응답수정계수(R)는 탄성해석으로부터 얻은 탄성부재력을 수정하는데 사용되는 값으로서, 달리 표현하면 응답수정계수는 설계지진 발생시 구조물의 비탄성 거동을 유도하는 계수라 할 수 있다. 따라서 내진설계시 비탄성설계응답스펙트럼 (inelastic design response spectrum)은 설계지진시 요구되는 탄성응답스펙트럼 (linear elastic design response spectrum)을 응답수정계수(R)로 나누어 구하게 된다. 따라서 탄성설계응답스펙트럼보다 작은 비탄성설계응답스펙트럼을 이용해 밀면전단력을 산정하여 설계하게 되므로 구조물은 설계지진 작용시 비탄성 거동을 하게 된다. 이 밀면전단력 산정식은 기준들마다 다소 차이가 있지만 일반적으로 다음 식 (1)과 같이 정의될 수 있다. 식 (1)에서  $C_s/R$ 이 비탄성설계응답스펙트럼이 되고, 만약 식 (1)에서 R로 나누지 않은 밀면전단력을 이용하여 구조물을 설계하게 되면 구조물은 설계지진하중 작용시 탄성거동을 하게 되는 것이다.

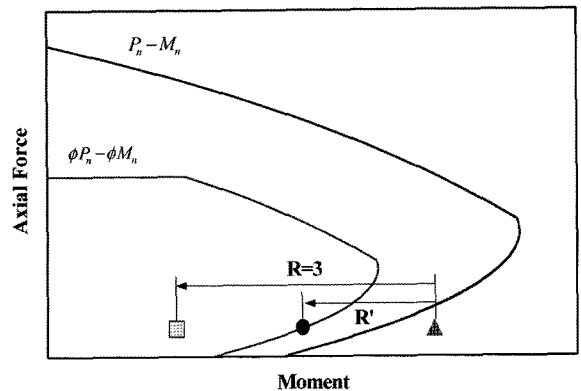
$$V = \frac{C_s W}{R} \quad (1)$$

여기서, V: 밀면전단력,  $C_s$ : 탄성응답스펙트럼, W: 구조물의 중량, R: 응답수정계수

현행 내진설계는 Fig. 1과 같이 탄성응답스펙트럼에서 구한 지진하중을 응답수정계수로 나누어 소성설계를 하는 것이다. 즉 Fig. 1(b)에 보이는 바와 같이 탄성응답스펙트럼에서 구한 지진하중(▲)을 현행 단주의 응답수정계수 3으로 나누어 구해진 설계지진하중에 의하여 부재에 발생하게 되는 모멘트(■)가 기본설계(고정하중+차량하중 등)에 의해 설계된 부재가 보유하고 있는  $\phi M_n$ (●)보다 매우 작을 경우에도 Fig. 1(a)와 같이 응답수정계수 3을 적용했을 시의 요구변위연성도를 똑같이 확보하도록 설계된다면 이는 필요이상의 과도한 연성능력을 확보할 경우도 발생할 수 있으므로 비경제적인 설계가 된다. 즉 경제적인 설계를 하려면 기본설계에 의한 단면이 내진설계시 소요되는 응답수정계수 (R')를 구하고 그 소요응답수정계수와 교각주기에 의한 소요연성능력을 보유하면 되는 것이다. 즉 중·저진 지역에 속하는 우리나라에서는 설계지진하중이 강진지역의 설계지진하중보다 작으므로 내진설계시 완전연성 개념보다는 소요되는 연성에 따라 내진설계하는 개념인 한정연성설계법을 도입하는 것이 바람직하다.



(a) Seismic P-Δ curve



(b) P-M curve for seismic design

Fig. 1 Response modification factor

### 3. 원형단면 RC 교각

#### 3.1 요구연성도에 따른 심부구속철근비

국내외의 82개 원형단면 RC 교각 실험체에 대한 실험 연구 결과로부터 변위연성도 5에 적합하도록 제안된 심부구속철근비 산정식은 박창규 등<sup>3)</sup>의 연구에서 다음 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$\rho_s = 1.68 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right)}{f_{yh}} \frac{P}{f_{ck} A_g} + 1.85(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_s$  : 심부구속철근비

$\rho_l$  : 주철근비

$f_{ck}$  : 콘크리트 설계기준 강도 (MPa)

$f_{yh}$  : 심부구속철근의 항복강도 (MPa)

$A_g$  : 기둥의 전단면적 ( $\text{mm}^2$ )

$A_c$  : 기둥심부의 면적 ( $\text{mm}^2$ )

$P$  : 축방향 하중 (N)

2장에서 기술한 바와 같이 RC 교각에 대한 한정연성 개념 내진설계를 위하여 요구변위연성도에 따라 소요 심부구속철근비를 달라지게 하기 위해서는 식 (2)의 1항과 2항의 계수가 변해야 한다. 따라서 요구변위연성도에 따른 식 (2)에 대한 실험 결과를 다음 Fig. 2와 같이 분석하였다. Fig. 2의 요구변위연성도  $\mu_{rqd}$ 는 각각 3, 4, 6, 7로 하고 분석에 사용된 심부구속철근비 기준  $\rho_{rqd}$ 는 식 (2)을 적용하였다. Fig. 2(a)에 보이는 바와 같이  $\mu_{rqd}=3$ 인 경우는 모든 실험 결과가 요구연성도를  $\mu_{rqd}=7$ 을 만족함으로써 심부구속철근비를 줄여야 하며, Fig. 2(d)의  $\mu_{rqd}=7$ 인 경우에는 많은 실험 결과가 요구연성도에 만족하지 못하여 심부구속철근비를 증가시켜야 하는 것으로 나타났다. 따라서 각각의 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근비 산정식 (2)에 대한 보정계수를 이전

연구<sup>3)</sup>와 동일한 방법으로 구하였으며, 그 결과를 다음 Table 1에 나타내었다. 분석 결과 요구변위연성도가 3일 경우에는 식 (2)의 철근비의 50%만 필요한 것으로 나타났으며, 요구변위연성도가 7일 경우에는 식 (2)의 철근비의 1.5배에 해당하는 철근비가 필요한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 이용하여 다양한 요구연성도에 따른 심부구속철근비 식을 정리하면 다음 식 (3)~(7)과 같으며, 요구변위연성도( $\mu_{rqd}$ ) 3, 4, 6, 그리고 7 경우의 심부구속철근비 식에 대한 실험체의 배근된 심부구속철근비와 각각의 요구연성도에 대한 실험변위연성도 비교 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Figs. 2와 3을 비교해보면 요구변위연성도 3과 4는 실험 결과가 2사분면에서 1사분면으로 이동되었으며, 요구변위연성도 6과 7은 1사분면과 4사분면에서 2사분면과 3사분면 방향으로 이동되어 전체적으로 1사분면과 3사분면에 실험 결과가 모이는 바람직한 결과를 나타내었다.

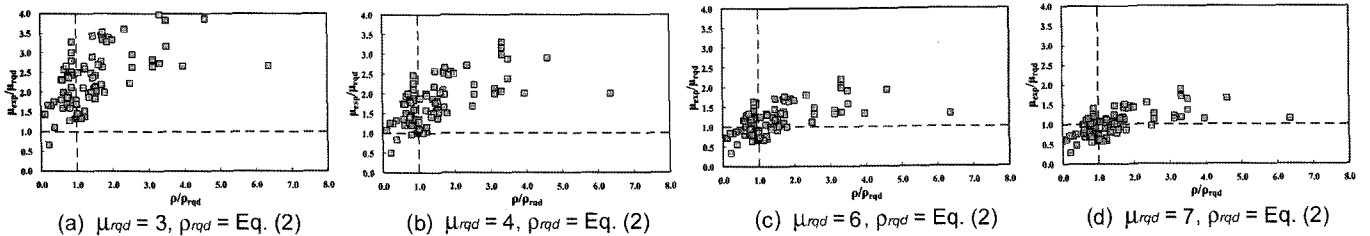
$$\rho_{s, \mu=3} = 0.84 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right)}{f_{yh}} \frac{P}{f_{ck} A_g} + 0.93(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (3)$$

$$\rho_{s, \mu=4} = 1.26 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right)}{f_{yh}} \frac{P}{f_{ck} A_g} + 1.39(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (4)$$

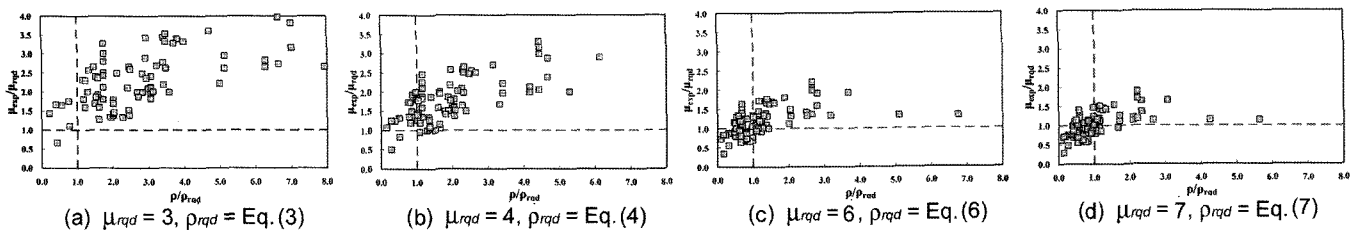
$$\rho_{s, \mu=5} = 1.68 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right)}{f_{yh}} \frac{P}{f_{ck} A_g} + 1.85(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (5)$$

**Table 1** Modification factor for the confinement steel ratio of eq. (2) in terms of displacement ductility

Modification factor	Required displacement ductility				
	3	4	5	6	7
$\gamma$	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50



**Fig. 2** Normalized displacement ductility according to various required ductility in terms of proposed confinement steel ratio as eq. (2)



**Fig. 3** Normalized displacement ductility according to various required ductility in terms of proposed confinement steel ratio as eqs. (3),(4),(6) and (7)

$$R_{s,\mu=6} = 2.10 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g}}{f_{yh}} + 2.31(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (6)$$

$$R_{s,\mu=7} = 2.52 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g}}{f_{yh}} + 2.77(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \quad (7)$$

다양한 요구변위연성도( $\mu_{rqd}$ )에 따른 심부구속철근비 식 (3)~(7)의 계수를 요구변위연성도에 대한 함수로 표현하면 식 (8)과 같이 일반화 할 수 있다. 여기서 식 (8)은 실험결과 평균값으로부터 유도되었으므로 설계시 안전을 고려하기 위하여 할증계수  $\phi$  도입하였다. 다만 이 값은 차후 더 많은 실험 결과와 우리나라와 같은 중저진지역의 지진강도들을 함께 고려하여 산출되어야 할 것이다.

$$\rho_s = \phi \times \left\{ \begin{aligned} & (0.42\mu_{rqd} - 0.42) \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g}}{f_{yh}} \\ & + (0.46\mu_{rqd} - 0.46)(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^{1.5} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

여기서,  $\phi$ : 할증계수

### 3.2 내진성능 평가식

원형 철근콘크리트 교각에 대한 실험 결과들의 평균값으로부터 유도된 요구변위연성도에 따른 소요심부구속철근비 산정식( $\phi = 1$ ) 식 (8)을 변위연성도( $\mu_\Delta$ )에 대하여 정리하면 식 (9)가 되며 이 식은 원형 RC 교각의 내진성능 평가식이 된다. 식 (8)은 본 논문의 서론에서 기술한 바와 같이 소성힌지 구간내에 주철근 겹침이음이 없는 경우에 해당하는 심부구속철근비 산정식이다. 따라서 내진성능평가식 식 (9)도 주철근 겹침이음이 없는 교각에 대한 평가식으로 제한된다. 또한 시간이 지남에 따라서 콘크리트의 탄산화에 따른 강도감소나 피복 콘크리트 균열 및 유실에 따른 총단면적 감소, 주철근 및 심부구속철근의 노출로 인한 부식으로 강도감소 및 철근단면적 감소가 발생할 수 있다. 따라서 식 (9)의 적용시에는 성능평가 시점에 보유하고 있는 물성값을 반영하는 것이 바람직하다. 식 (9)의 아래첨자 “r”은 성능평가 시점에 보유하고 있는 값을 의미한다. 여기서 심부 콘크리트 단면적비  $A_r$ 을 구하기 위한  $A_g$ 는 총단면적을 사용하며 그 이유는 다음과 같다. AASHTO 심부구속철근비 산정식은 축방향 압축력을 받는 나선교각에 있어서 콘크리트 덮개가 파괴되기 이전의 최대 하중지지능력은 덮개가 파괴된 후 나선철근 응력이 항복상태에 도달할 때의 하중지지능력과 같다는 가정에서 유도되어 단면적의 변화( $A_r = A_g / A_c$ )를 고려하였기 때문이다. 다만, 소성힌지구간의 피복 콘크리트가 유실된다면 교각의 전체의 내진성능에 영향을 미치는 위험단면이 부담하는 축하중비가 증가하게 되

므로 연성능력은 감소하게 된다. 따라서 피복 콘크리트 유실시 총단면적( $A_g$ )의 감소는 식 (9)에서 축하중비의  $A_g$ 만 감소하게 되어  $A_{g,r}$ 로 표현하였으며, 심부 콘크리트 단면적비  $A_r$ 에서의  $A_g$ 는 설계시의 총단면적 그대로를 사용하게 된다.

$$\mu_\Delta = \frac{\rho_{s,r}}{1 + \frac{0.42 \frac{f_{c,r}}{f_{y,h,r}} (A_r - 1) \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} + 0.46(\rho_{l,r} - 0.01) \left( \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} \right)^{1.5}}{\rho_{s,r}}} \quad (9)$$

여기서,  $A_r = (A_g / A_c) \geq 1.2$

본 연구에서 분석한 실험체의 제원 및 물성을 이용하여 식 (9)에 의해 계산된 변위연성도(세로축)와 실제 실험 결과에 따른 변위연성도(가로축)를 Fig. 4에 비교하였다. Fig. 4를 보면 식 (9)를 이용하여 구한 변위연성도가 실험 변위연성도 보다 최대 1.97배(실험 변위연성도 = 5.50, 해석 변위연성도 = 10.87) 큰 경우도 있지만, 실험에 의한 변위연성도가 해석 변위연성도보다 최대 2.83배(실험 변위연성도 = 11.1, 해석 변위연성도 = 3.92) 큰 경우도 나타났다. 그러나 전체적으로는 평가식에 의한 변위연성도가 실험에 의한 변위연성도와 유사하게 나오는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 4의 결과를 통계분석 프로그램 SPSS 12.0<sup>12)</sup>를 이용하여 실험에 의한 변위연성도를 독립변수로 평가식에 의한 변위연성도를 종속변수로 선형회귀분석을 한 결과 실험값과 제안식 값의 상관도를 나타내는 결정계수( $R^2$ )과 상관계수( $R$ )이 각각 39.8%와 63.1%로 다소 낮게 나타났다. 이는 분석된 실험체들의 철근상세와 실험오차 등이 포함되어 나타난 결과로 판단된다.

## 4. 사각단면 RC 교각

### 4.1 요구연성도에 따른 심부구속철근비

국내외의 54개 사각단면 RC 교각 실험체에 대한 실험

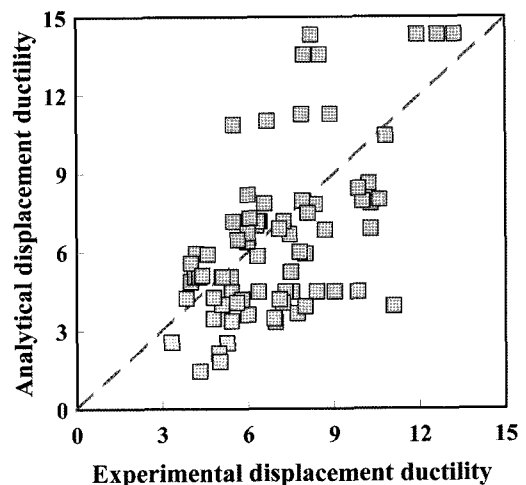


Fig. 4 Analytical displacement ductility in terms of experimental displacement ductility for circular column

연구 결과로부터 변위연성도 5에 적합하도록 심부구속 철근비 산정식을 박창규 등<sup>4)</sup>의 연구에서 다음 식 (10)과 같이 제안하였다.

$$\rho_s = 1.12 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 2.91(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_y} \quad (10)$$

사각단면 RC 교각에서도 “3. 원형단면 RC 교각”과 같이 한정연성개념 내진설계를 하기 위해서는 식 (10)의 1항과 2항 계수가 변해야 한다. 따라서 요구변위연성도 5에 따른 식 (10)에 대한 실험 결과를 다음 Fig. 5과 같이 살펴보았다. Fig. 5의 요구변위연성도  $\mu_{rqd}$ 는 각각 3, 4, 6, 7로 하고 분석에 사용된 심부구속철근비 기준  $\rho_{rqd}$ 는 식 (10)을 적용하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 모든 실험 결과가 Fig. 2 원형단면의 결과와 유사하게 나타났다. 따라서 요구연성도 5보다 낮은 요구연성도에서는 심부구속철근비를 줄이고, 5보다 높은 요구연성도에서는 심부구속철근비를 증가시키 위한 심부구속철근비 산정식 (10)에 대한 보정계수를 구하였으며, 그 결과 Table 1과 동일하게 나타났다. 이상의 결과를 이용하여 다양한 요구연성도에 따른 심부구속철근비 식을 정리하면 다음 식 (11)~(15)와 같으며, 요구변위연성도( $\mu_{rqd}$ ) 3, 4, 6, 그리고 7 경우의 심부구속철근비 식에 대한 실험체의 배근된 심부구속철근비와 각각의 요구연성도에 대한 실험변위연성도 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

$$\rho_{s, \mu=3} = 0.56 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 1.46(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_{yh}} \quad (11)$$

$$\rho_{s, \mu=4} = 0.84 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 2.18(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_{yh}} \quad (12)$$

$$\rho_{s, \mu=5} = 1.12 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 2.91(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_{yh}} \quad (13)$$

$$\rho_{s, \mu=6} = 1.40 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 3.64(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_{yh}} \quad (14)$$

$$\rho_{s, \mu=7} = 1.68 \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 4.37(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2}{f_{yh}} \quad (15)$$

Figs. 5와 6을 비교해보면 사각단면에 대한 실험 결과도 원형단면과 같이 요구변위연성도 3과 4는 실험 결과가 2사분면에서 1사분면으로 이동되었으며, 요구변위연성도 6과 7은 1사분면과 4사분면에서 2사분면과 3사분면 방향으로 이동되어 전체적으로 1사분면과 3사분면에 실험 결과가 모이는 바람직한 결과를 나타내었다.

3.1절과 같이 다양한 요구변위연성도에 따른 심부구속철근비 산정식 식 (11)~(15)의 계수를 요구변위연성도에 대한 함수로 표현하면 식 (16)과 같이 일반화 할 수 있다.

$$\rho_s = \phi \times \left\{ \begin{aligned} & (0.28\mu_{rqd} - 0.28) \frac{f_{ck} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{P}{f_{ck} A_g}}{f_{yh}} \\ & + (0.73\mu_{rqd} - 0.73)(\rho_l - 0.01) \left( \frac{P}{f_{ck} A_g} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

#### 4.2 내진성능 평가식

사각단면 철근콘크리트 교각에 대한 실험 결과의 평균 값으로부터 유도된 요구변위연성도에 따른 소요심부구속철근비 산정식( $\phi = 1$ ) 식 (16)을 변위연성도( $\mu_d$ )에 대하여

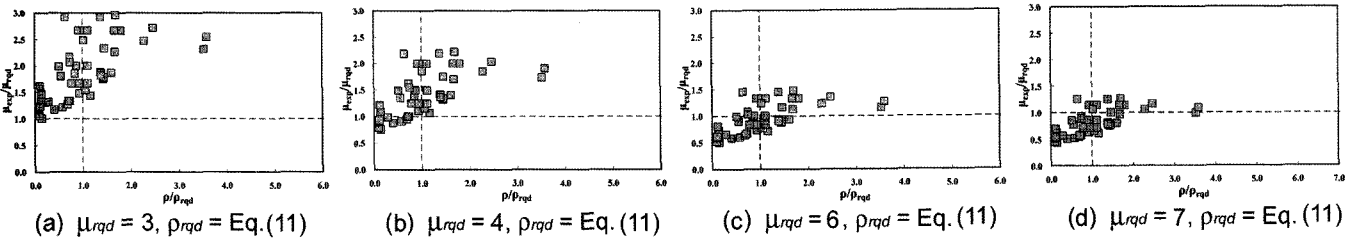


Fig. 5 Normalized displacement ductility according to various required ductility in terms of proposed confinement steel ratio as eq. (11)

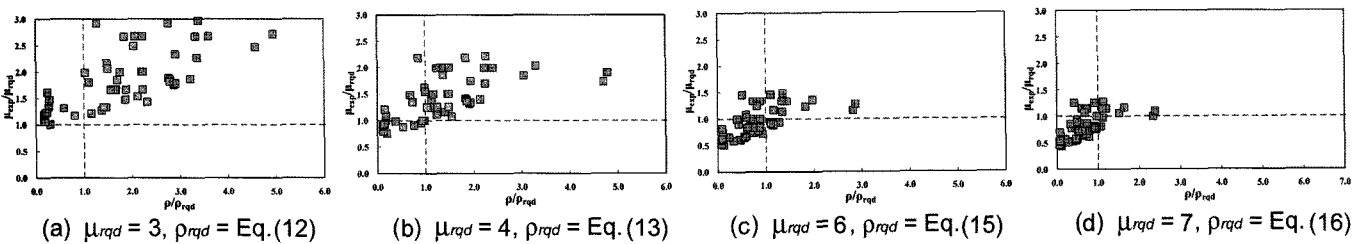


Fig. 6 Normalized displacement ductility according to various required ductility in terms of proposed confinement steel ratio as eqs. (12),(13),(15) and (16)

정리하면 식 (17)이 되며 이 식은 사각단면 RC 교각의 내진성능 평가식이 된다.

$$\mu_{\Delta} = 1 + \frac{\rho_{s,r}}{0.28 \frac{f_{c,r}}{f_{yh,r}} (A_r - 1) \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} + 0.73 (\rho_{l,r} - 0.01) \left( \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} \right)^2} \quad (17)$$

여기서,  $A_r = (A_g / A_c) \geq 1.2$

본 사각단면 내진성능평가식 식 (17)도 주철근 겹침이 없는 교각에 대한 평가식으로 제한된다. 또한 콘크리트 단면적( $A_g$  혹은  $A_{g,r}$ )의 적용방법도 원형단면의 경우와 동일하다.

본 연구에서 분석한 실험체의 제원 및 물성을 이용하여 식 (17)에 의해 계산된 변위연성도(세로축)와 실제 실험 결과에 따른 변위연성도(가로축)를 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 7을 보면 식 (17)을 이용하여 구한 변위연성도가 최대 2.2배(실험 변위연성도 = 6.94, 해석 변위연성도 = 15.12) 큰 경우도 있지만, Fig. 4 원형의 경우와 유사하게 실험에 의한 변위연성도가 해석변위연성도 보다 최대 3.3배(실험 변위연성도 = 4.85, 해석 변위연성도 = 1.47) 큰 경우도 나타났다. 또한 Fig. 7의 결과를 통계분석 프로그램 SPSS 12.0를 이용하여 선형회귀분석을 한 결과 실험값과 제안식 값의 상관도를 나타내는 결정계수( $R^2$ )와 상관계수(R)이 각각 42.9%와 65.5%로 다소 낮게 나타났다. 이 또한 분석된 실험체들의 철근상세와 실험오차 등이 포함되어 나타난 결과라 판단된다.

### 5. 기존 RC 교각의 내진성능

기존 노후화된 교각의 내진성능은 Fig. 8의 탄성응답 스펙트럼<sup>10)</sup>으로부터 결정되는 탄성지진력에 의해 교각에 발생하는 모멘트와 대상 교각이 보유하고 있는 보유강도로부터 결정된다. 즉 평가대상 교각은 사용기간이 길어

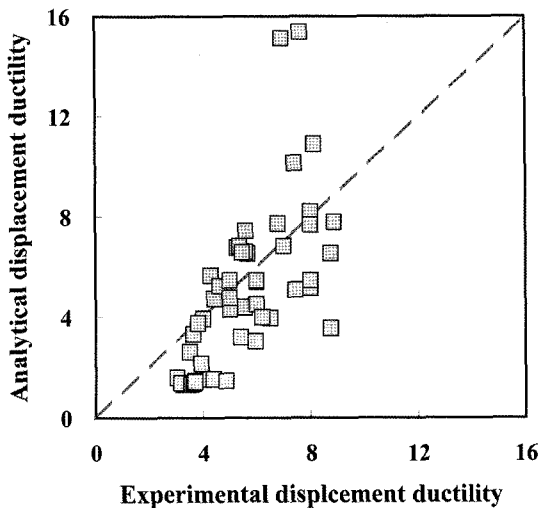


Fig. 7 Analytical displacement ductility in terms of experimental displacement ductility for rectangular column

짐에 따라 열화가 발생하여 철근부식 뿐만 아니라 콘크리트의 강도등도 감소하게 되어 보유강도는 설계당시 강도보다 감소한다. 그리고 2장과 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 1단계에서 구한 기존 교각이 보유하고 있는 저항 모멘트와 탄성응답 스펙트럼에서 구한 설계모멘트로 부터 요구되는 응답수정계수( $R_{rqd}$ )를 구한 후 그에 따른 요구연성도( $\mu_{rqd}$ )를 구한다. 마지막으로 제시한 평가식을 이용하여 교각이 보유하고 있는 내진성능( $\mu_R$ )을 파악한 후 요구변위연성도( $\mu_{rqd}$ )와 비교한 후에 보수·보강의 필요성을 결정해야 한다. 이상을 요약하면 다음과 같다.

- 1단계 : 탄성응답스펙트럼에 의한 설계지진하중 계산
- 2단계 : 교각의 P-M 상관도에 의한 요구응답수정계수 ( $R_{rqd}$ ) 산정
- 3단계 :  $R_{rqd}$ 에 의한 요구변위연성도( $\mu_{rqd}$ ) 계산
- 4단계 : 식 (10) 혹은 식 (19)를 이용한 교각의 보유내진성능( $\mu_R$ ) 판단
- 5단계 : 보수·보강 여부 결정
  - $\mu_R \geq \mu_{rqd}$ : 내진성능 만족, 보강 불필요
  - $\mu_R < \mu_{rqd}$ : 내진성능 불만족, 보수·보강 필요

### 6. Macro 해석 프로그램에 의한 내진성능 평가식 검증

본 논문에서 제시한 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가식에 대한 검증을 위하여 사용된 프로그램은 정영수<sup>14)</sup> 등이 개발한 철근콘크리트 교각의 비선형 해석 프로그램 SARCF<sup>15)</sup>를 토대로 이대형<sup>16)</sup>이 철근콘크리트 교각의 해석적 이력거동 모델을 수정 제시한 IARCC(inelastic analysis of reinforcement concrete column)이다.

#### 6.1 원형단면 RC 교각

3.2절에서 제시한 원형 RC 교각의 내진성능 평가식에 대하여 IARCC를 이용하여 타당성을 검증하고자 한다. 3.2절에서는 실험 결과와 제안식에 의한 결과를 비교하였으나, RC 교각의 내진성능은 다양한 변수들에 의해 영향을 미치므로 Table 2와 같은 변수로 하여 120개의 가상 실험체로 검토하였다. 단면 직경은 1.0 m와 2.0 m 2가지의 경우로 가정하였으며, 콘크리트의 강도는  $f_{ck} = 24$ ,

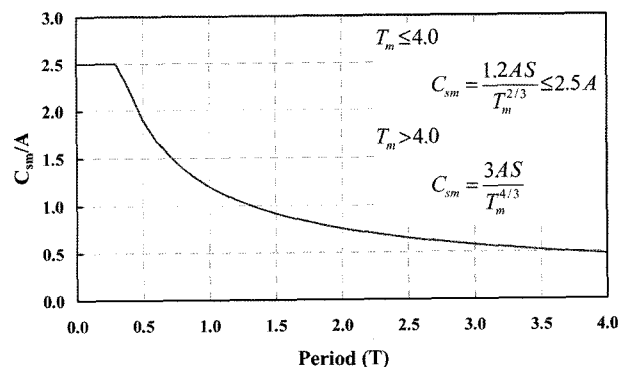


Fig. 8 Design response spectrum

**Table 2** Parametric study for circular RC columns

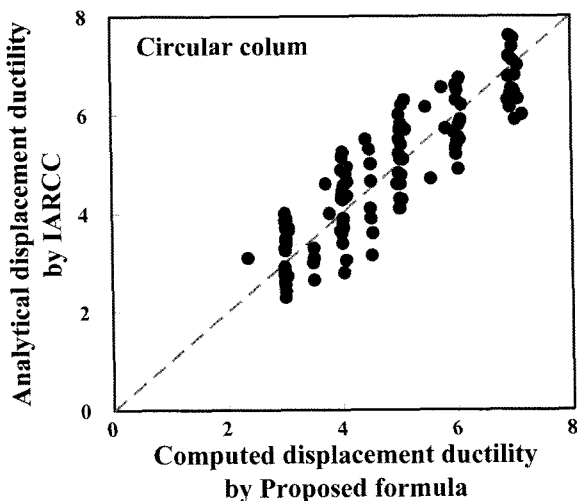
Parameter	Details
Section property(D) (mm)	1,000, 2,000
$f_{ck}$ (MPa)	24, 27
$f_y$ and $f_{yh}$ (MPa)	300, 400
Required displacement ductility	3~7
Transverse steel ratio (%)	0.13 ~ 3.5
Longitudinal steel ratio (%)	1, 2
Axial force ratio (%)	10, 20, 30

27 MPa를 철근의 강도는  $f_y=300, 400$  MPa를 가정하였다. 또한 심부구속철근의 강도는 일반적으로 주철근의 강도와 동일하거나 작은 강도를 사용하므로 본 해석 연구에서는 주철근의 강도와 동일하게 가정하였다. 주철근비는 1%와 2%로 가정하였으며 축하중비는 10%, 20%, 30%로 설정하였다. 그리고 가정된 심부구속철근비는 제안식 (8)을 사용하여 요구변위연성도 3~7을 만족하기 위한 양으로 결정하였다.

다음 Fig. 9에 보이는 바와 같이 제안식에 의한 변위연성도와 IARCC를 이용한 해석 결과를 비교하였다. 제안식에 의한 변위연성도와 해석에 의한 변위연성도 차이는  $-1.23(\text{제안식} = 4.02, \text{IARCC} = 5.02) \sim +1.37(\text{제안식} = 4.52, \text{IARCC} = 3.15)$  범위였으며, SPSS12.0를 이용하여 선형회귀분석을 한 결과 두 값의 상관도를 나타내는 결정계수 ( $R^2$ )와 상관계수(R)가 각각 0.793과 0.890으로 나타났다.

### 6.2 사각단면 RC 교각

6.1절과 같이 4.2절에서 제시한 사각단면 RC 교각의 내진성능 평가식에 대하여 IARCC를 이용하여 그 타당성을 검증하였다. 분석에 사용된 변수는 다음 Table 3과 같이하여 120개의 가상 실험체로 검토하였다. 단면 형상은 정사각형 단면으로 가정하였으며 그 외의 조건은 6.1



**Fig. 9** Analytical displacement ductility results from IARCC in terms of computed displacement ductility by proposed formula(eq. (9)) for circular column

**Table 3** Parametric study for rectangular RC columns

Parameter	Detail
Section property(B×H) (mm)	(1,000×1,000) and (2,000×2,000)
$f_{ck}$ (MPa)	24, 27
$f_y$ and $f_{yh}$ (MPa)	300, 400
Required displacement ductility	3~7
Transverse steel ratio (%)	0.09 ~ 2.18
Longitudinal steel ratio (%)	1, 2
Axial force ratio (%)	10, 20, 30

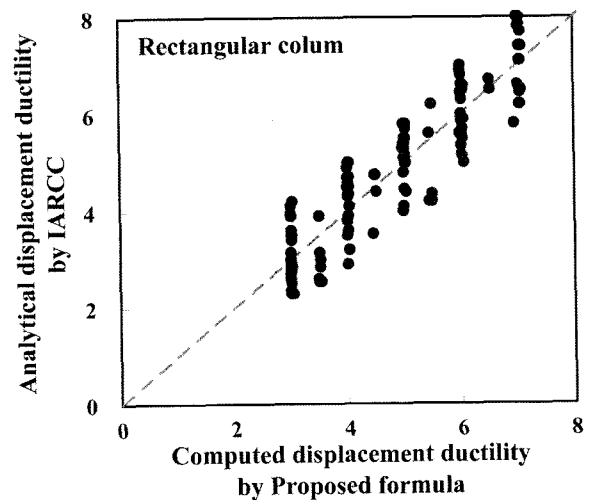
절의 원형단면과 동일하다. 다만 요구연성도를 만족하기 위한 심부구속철근 면적비는 식 (16)을 사용하였다.

다음 Fig. 10에 보이는 바와 같이 제안식에 의한 변위연성도와 IARCC를 이용한 해석 결과를 비교하였으며, 제안식과 해석에 의한 변위연성도 차이는  $-1.17(\text{제안식} = 3.03, \text{IARCC} = 4.20) \sim +1.30(\text{제안식} = 5.5, \text{IARCC} = 4.2)$  범위였다. 또한 원형단면과 동일하게 SPSS 12.0을 사용하여 선형회귀분석을 한 결과 두 값의 상관도를 나타내는 결정계수( $R^2$ )와 상관계수(R)가 각각 0.815와 0.903으로 나타났다.

## 7. 결 론

본 연구 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 우리나라와 같은 중저진지역에서의 내진설계는 완전연성개념이 아닌 한정연성개념을 도입하는 것이 바람직하다. 따라서 기존 국내외 실험 결과를 이용하여 요구연성도를 변수로한 심부구속철근비 산정식을 제안하였다.
- 2) 1992년 내진설계가 도입되기 이전에 설계 및 시공되어 현재 공용중인 철근콘크리트 교각에 대한 보



**Fig. 10** Analytical displacement ductility results from IARCC in terms of computed displacement ductility by proposed formula(eq. (17)) for rectangular column

유내진성능의 파악한 후 보수·보강을 결정하여 지진시에 안전을 도모할 필요가 있다. 이에 기존 국내외 실험 결과를 이용하여 주철근 겹침이음이 없는 교각의 내진성능 평가식을 제안하였다.

- 3) 본 연구에서 제시한 내진성능평가식에 의해 산출된 변위연성도와 Macro 해석 프로그램 IARCC를 이용하여 산출된 변위연성도를 비교한 결과 두 결과의 상관계수(R)가 약 90%로 그 타당성이 높은 것으로 나타났다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 정영수, 박창규, 이은희, “형상비 2.5 RC 교각의 내진 곡률연성도”, 한국지진공학회 논문집, 8권 3호, 2004, pp.1~11.
2. 이재훈, 배성용, 윤석구, “나선철근교각의 내진성능실험”, 대한토목학회 논문집, 21권 1A호, 2001, pp.109~121.
3. 박창규, 이대형, 이범기, 정영수, “원형 철근콘크리트 교각의 내진성능(II)-심부구속철근비 제안-”, 콘크리트학회 논문집, 17권 5호, 2005, pp.775~784.
4. 박창규, 정영수, 윤상철, 이대형, “사각단면 철근콘크리트 심부구속철근비”, 콘크리트학회 논문집, 18권 6호, 2006, pp.749~757.

5. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2002.
6. 이대형, 박창규, 정영수, “겹침이음 및 보강된 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 Macro 모델”, 대한토목학회 논문집, 25권, 5A호, 2005, pp.857~864.
7. 손혁수, “심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구”, 박사학위논문, 영남대학교, 2002.
8. Wehbe, N. I., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H., “Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement”, *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.2, Mar.-Apr. 1999, pp.248~259.
9. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Ed.*, American Association of state Highway and Transportation Officials, USA, 2000, pp.389~424.
10. Eurocode 8, *Design Provision for Earthquake Resistance of Structures, Part 2. Bridges*, European Committee for Standardization, 1996, pp.1~98.
11. New Zealand Standard, *Concrete Structures Standard : Part 1-The Design of Concrete Structures*, NZS3101, 1995, pp.91~106.
12. 무역경영사, Window용 SPSS, 무역경영사, 2000, 518pp.
13. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2000, pp.451~474.
14. Chung, Y. S., *Automated Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Frame*, Ph. D Thesis, Columbia Univ, 1988.
15. Chung, Y. S., Meyer, C., and Shinozuka, M., *Damage Assessment of Reinforced Concrete Members*, Technical Report NCEER- 87-0022, October 1987.
16. 이대형, 정영수, “원형 철근콘크리트 교각의 강성 및 강도감소지수 결정”, 한국지진공학회논문집, Vol.4, No.2, 2000, pp.73~81.

**요 약** 최근까지 우리나라는 활성단층으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 지진에 대하여 안전지대라 여기었다. 그러나 최근의 강진으로 인간의 생명과 국가 경제에 막대한 손실을 발생시킨다는 것을 인지하게되었다. 따라서 최근에는 사회기간시설물에 대한 내지설계의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 82개 원형단면과 54개의 사각단면의 철근콘크리트 교각에 대한 국내외의 실험 결과를 이용하여 철근콘크리트 교각의 내진설계와 성능평가에 대한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 새로운 내진설계법은 중저진지역에 속하는 우리나라의 실정에 맞도록 한정연성설계 개념을 도입하였다. 또한 우리나라의 철근콘크리트 교각의 내진성능에 있어 중요한 점은 1992년 내지설계규정이 도입되기 이전에 시공된 교각들의 내진성능 확보이다. 따라서 제안된 철근콘크리트 교각의 내진성능평가식은 기존 교각들의 내진 보수 및 보강 방안을 선정하는데 유익하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

**핵심용어** : 철근콘크리트 교각, 한정연성설계법, 내진성능 평가