

# 철근콘크리트 원형단면 교각의 유효강성

## Effective Stiffness of Circular Reinforced Bridge Columns

배성용<sup>\*</sup>      김준범<sup>\*\*</sup>      이재훈<sup>\*\*\*</sup>  
Bae, Sung Yong      Kim, Jun Beom      Lee, Jae Hoon

---

### ABSTRACT

The objectives of this study are to investigate effective stiffness of circular reinforced bridge columns and to provide reasonable effective stiffness equations for seismic design to the current Korean Bridge Design Standard. The material nonlinear analysis was conducted for 5184 columns of which variables were the concrete compressive stress, the steel yielding stress, the longitudinal steel location parameter, the longitudinal steel ratio, the axial load level, and the diameter of section. The current Korean Bridge Design Standard generally used the gross section stiffness because of unclear provision, it may be non-conservative because of being evaluated greater design seismic force and less design displacement than those of the abroad provision. Therefore, the proposed effective stiffness equations include three variables such as : the longitudinal steel location parameter, the longitudinal steel ratio, and the axial load ratio. Two equations of effective stiffness are proposed which may be used for earthquake force estimation and for earthquake displacement estimation, respectively.

---

### 1. 서 론

국내 도로교설계기준에는 철근콘크리트 교각 내진설계의 부재강성에 대한 명확한 규준이 없으므로 지진하중에 대한 구조해석시 부재강성으로 비균열 전단면강성  $E_c I_g$ 를 주로 사용하고 있다. 그러나, 탄성해석시 지진하중이 작용하는 철근콘크리트 교각에 소성힌지가 발생하여 응답수정계수(response modification factor)를 적용하는 경우, 철근콘크리트 교각의 항복점을 연결한 유효강성  $E_c I_{eff}$ 을 사용하는 것이 합리적인 것이다. 철근콘크리트 교각에 대한 항복점의 정의는 여러 방법으로 제안되고 있으나, 일반적으로 단면의 최외곽 인장철근이 항복하기 시작할 때 항복변위  $\Delta_y$ 를 결정하고, 이때의 강성을 유효강성으로 정의하고 있다. 전단면강성은 교각 전 길이에 걸쳐 균열이 전혀 발생하지 않은 초기강성을 의미하는 것으로 지진하중에 대한 구조해석에 전단면강성을 사용하는 것은 철근콘크리트교각의 비선형거동을 고려해 볼 때 비합리적이다. 특히, 전단면강성을 사용하면 과도하게 큰

---

\* 정회원, 영남대 공업기술연구소 연구원  
\*\* 정회원, 영남대 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 영남대 토목공학과 부교수

설계지진력이 계산되어 교각이 크게 설계되고, 이에 따라 심부구속철근의 요구량이 증가하여 경제성과 시공성이 좋지 않은 설계결과를 제공하는 요인이 된다. 또한, 설계변위를 검토할 때 전단면강성을 사용하는 경우에는 실제 교각에서 발생하는 변위보다 작은 변위를 계산하게 되므로 비안전측인 값을 얻게 된다. 따라서, 본 연구에서는 내진설계시 철근콘크리트 원형단면교각에 유효강성에 미치는 인자를 분석하고 설계지진력을 계산할 경우와 변위를 평가할 때 적용할 수 있는 유효강성식들을 제안하여 내진설계기준의 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 해석방법 및 변수

재료비선형해석에 적용한 콘크리트의 모델은 비구속콘크리트(unconfined concrete)과 구속콘크리트(confined concrete)로 구분하여 해석을 수행하였으며, 비구속콘크리트에는 Collins 등이 제안한 모델과 구속콘크리트에는 Mander 등에 의해 제안한 모델을 적용하였다. 철근의 모델은 Kent 등의 모델을 사용하였다. 항복곡률  $\phi_y$ 는 휨변형에 의한 곡률  $\phi_{yf}$ 와 종방향철근의 슬립에 의한 곡률  $\phi_{ys}$ 의 합으로 나타낼 수 있으며, 유효강성은 식 (1)으로 계산하였다. 여기서,  $M_y$ 는 최외곽철근이 항복할 때의 모멘트이며, 종방향철근 항복시의 슬립량  $\Delta L_s$ 은 Shima의 모델을 적용하여 식 (2)로 계산하였으며, 이에 따라  $\Delta_{ys}$ 와  $\phi_{ys}$ 를 결정하였다.

$$E_c I_{eff} = \frac{M_y}{\phi_y} \quad (1)$$

$$\Delta L_s = \frac{\epsilon_y (2 + 3500 \epsilon_y)}{d_b (f_{ck} / 204)^{2/3}} \quad (2)$$

재료비선형해석시, 그림 1과 그림 2에 나타낸바와 같이 철근콘크리트 원형단면교각의 강성은 단면유효강성(section effective stiffness,  $EI_{eff, s}$ )과 평균유효강성(average effective stiffness,  $EI_{eff, a}$ )으로 나타낼 수 있다. 기존의 실험결과를 근거로 하여 휨에 의한 변형과 종방향철근의 슬립에 의한 변형 등을 각각 해석시에 고려하였으며, 표 1에 나타낸 변수들을 조합하여 총 5,184개의 단면에 대하여 각각의 유효강성을 해석한 후, 다중선형회귀분석을 이용하여 유효강성식들을 도출하였다.

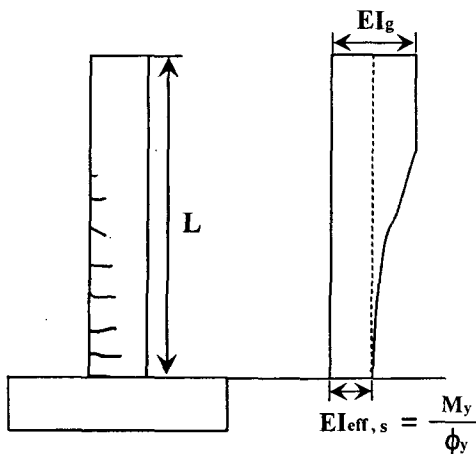


그림 1 철근콘크리트 교각의 단면유효강성

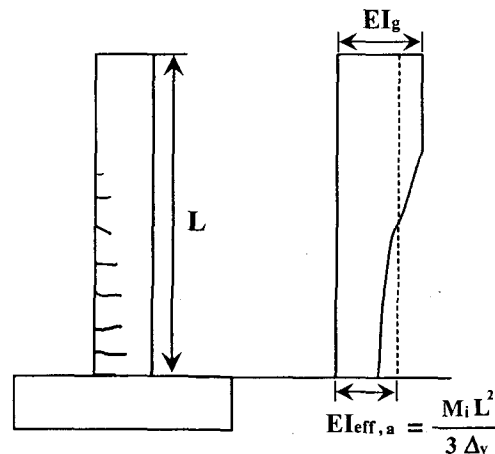


그림 2 철근콘크리트 교각의 평균유효강성

표 1 유효강성 해석에 사용된 변수

변수명	변수조건	조건수
유효강성, $E_c I_{eff}$	section effective stiffness average effective stiffness	2
변형, $\Delta$	flexure deformation flexure+slip deformation	2
원형단면의 지름, D	50cm, 100cm, 200cm	3
단면지름에 대한 최외곽철근의 중심까지 거리비, $\gamma$	0.7, 0.8, 0.9	3
콘크리트압축강도, $f_{ck}$	240kgf/cm <sup>2</sup> , 420kgf/cm <sup>2</sup> , 600kgf/cm <sup>2</sup>	3
종방향철근의 항복강도, $f_y$	3000kgf/cm <sup>2</sup> , 4000kgf/cm <sup>2</sup>	2
종방향철근비, $\rho$	0.01, 0.02, 0.03, 0.04	3
축력비, $\frac{P}{f_{ck} A_g}$	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4	8

### 3. 비선형해석에 따른 변수의 영향

#### 3.1 콘크리트압축강도의 영향

그림 3과 그림 4는 휨변형만 고려한 경우와 휨변형과 종방향철근의 슬립에 의한 변형을 고려한 단면유효강성비율을 나타내고 있다. 축력비가 0.15보다 낮은 경우의 단면유효강성비율은 콘크리트압축강도가 증가할수록 오히려 작아지는 경향을 보였으며, 축력비가 0.15보다 높은 경우에는 콘크리트압축강도가 증가할수록 단면유효강성비율이 증가하는 경향을 나타내었다.

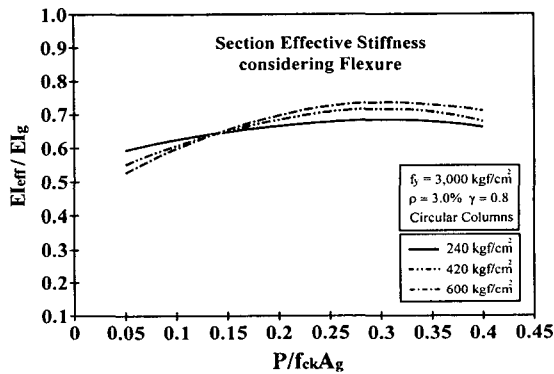


그림 3 단면유효강성비율  
(휨변형,  $\rho$ : 0.03)

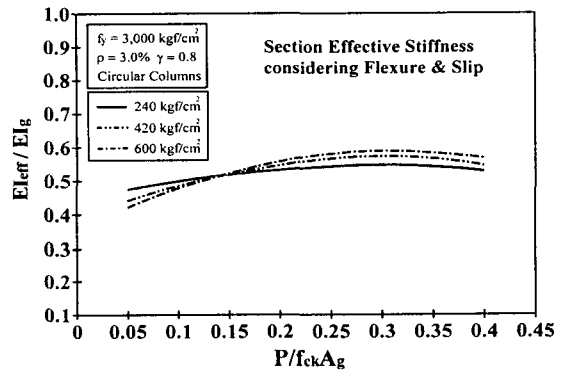


그림 4 단면유효강성비율  
(휨변형 & 슬립변형,  $\rho$ : 0.03)

#### 3.2 철근 항복강도의 영향

그림 5는 휨에 의한 변형을 고려한 대상 교각의 단면유효강성비율을 나타내고 있으며, 그림 6은 휨에 의한 변형과 종방향철근의 슬립에 의한 변형의 영향을 고려한 대상 교각의 단면유효강성비율을 나타내었다. 종방향철근의 항복강도 4000kgf/cm<sup>2</sup>보다 3000kgf/cm<sup>2</sup>인 경우가 단면유효강성비율은 축력비에 따라 1.07~1.15배 높게 계산되었다.

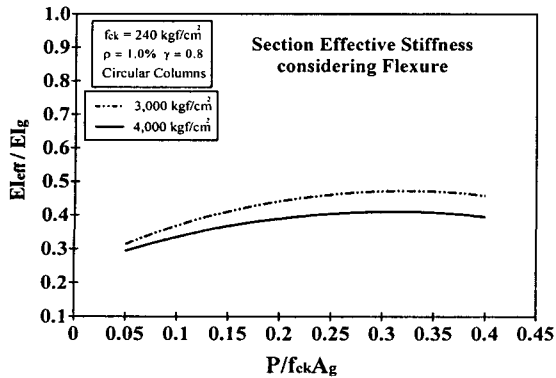


그림 5 단면유효강성비율(휨변형)

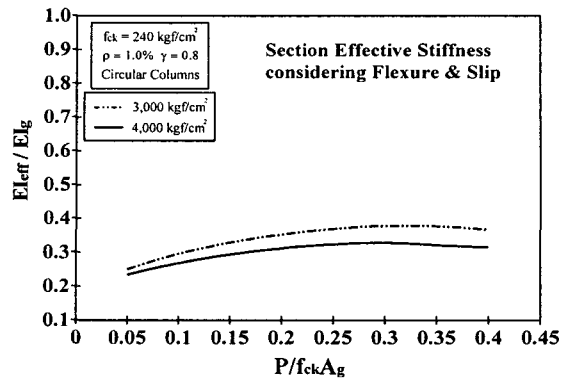


그림 6 단면유효강성비율(휨변형과 & 슬립변형)

### 3.3 단면지름에 대한 최외곽철근의 중심까지 거리비의 영향

원형단면지름에 대한 최외곽철근의 중심까지 거리비  $\gamma$  0.7, 0.8 및 0.9를 변수로 선택하여 재료비선형해석을 수행하였다. 그림 7은 휨에 의한 변형의 영향을 고려하여 단면유효강성비율을 나타내며, 그림 8은 휨에 의한 변형과 종방향철근의 슬립에 의한 변형의 영향을 고려한 단면유효강성비율을 나타내었다. 원형 단면지름에 대한 최외곽철근의 중심까지 거리비가 커지수록 단면유효강성비율은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

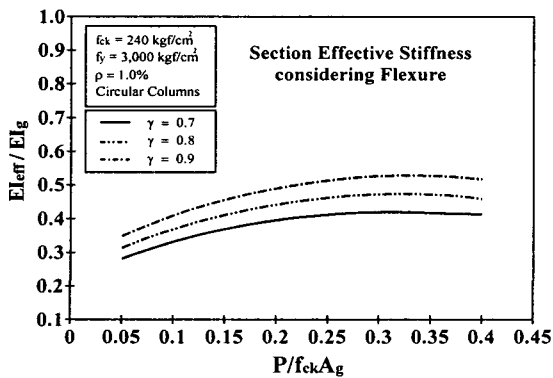


그림 7 단면유효강성비율(휨변형)

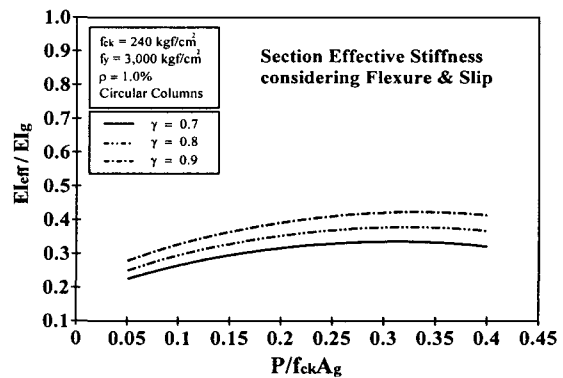


그림 8 단면유효강성비율(휨변형 & 슬립변형)

### 3.4 종방향철근비의 영향

종방향철근비가 유효강성에 미치는 영향을 분석하기 위해 원형단면에 대해 종방향철근비 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4를 변수로 선택하여 재료비선형해석을 수행하였다. 그림 9는 휨에 의한 변형의 영향을 고려한 단면유효강성비율을 나타내며, 그림 10은 휨에 의한 변형과 슬립에 의한 변형의 영향을 고려한 단면유효강성비율을 나타내었다. 원형단면의 종방향철근비가 증가할수록 단면유효강성비율은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

### 3.5 축력비의 영향

원형단면교각에 작용하는 축력이 유효강성에 미치는 영향을 분석하기 위해 원형단면에 대해 축력비

$\frac{P}{f_{ck} A_g}$  를 0.05씩 증가하여 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 및 0.4를 변수로 선택하여 재료비선형 해석을 수행하였다. 그림 11은 휨에 의한 변형과 슬립에 의한 변형을 고려한 단면유효강성비율과 평균 유효강성비율을 나타내고 있으며, 원형단면교각에 작용하는 축력이 높을수록 단면유효강성비율과 평균 유효강성비율은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

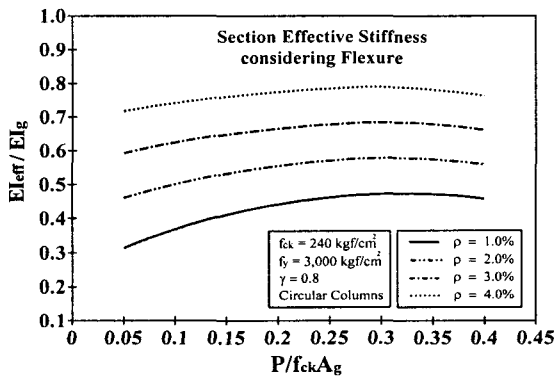


그림 9 단면유효강성비율(휨변형)

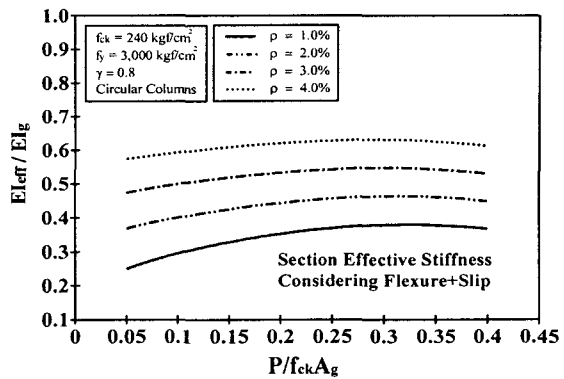


그림 10 단면유효강성비율(휨변형 & 슬립변형)

### 3.6 단면크기의 영향

원형단면교각의 크기효과(size effect)에 따른 유효강성에 미치는 영향을 분석하기 위해 원형단면지름 50cm, 100cm 및 200cm를 변수로 선택하여 재료비선형해석을 수행하였다. 그림 12는 휨에 의한 변형과 종방향철근의 슬립에 의한 변형을 고려한 단면유효강성비율을 나타내었으며, 원형단면의 크기효과에 따른 유효강성의 영향이 미치지 않는 것으로 분석되었다.

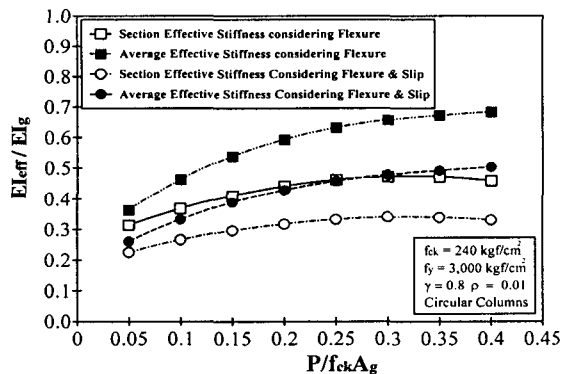


그림 11 축력비에 따른 유효강성비율

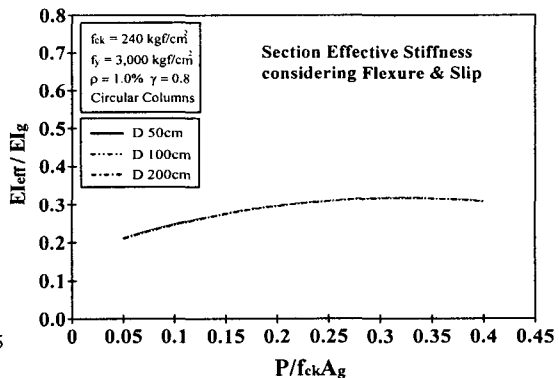


그림 12 단면유효강성비율(휨변형 & 슬립변형)

### 4. 제안된 유효강성식

유럽의 EC 8, 뉴질랜드의 NZ Bridge Manual 및 미국 캘리포니아주의 Caltrans에서는 휨에 의한 변형만을 고려한 단면유효강성을 적용하고 있으므로 실제 철근콘크리트 교각에 발생하는 휨에 의한 변형의 영향과 종방향철근의 슬립에 의한 변형의 영향을 고려한 유효강성보다 다소 큰 값을 사용하고 있다. 휨에 의한 변형의 영향만을 고려한 유효강성을 내진구조해석에 적용하는 경우, 설계지진력은 안

진측으로 평가되나 설계변위는 실제 교각에 발생하는 변위보다 작은 변위를 계산하게 되므로 비안전측으로 설계된다. 그러므로, 설계변위를 검토할 때에는 휨에 의한 변형과 종방향철근의 부착슬립의 변형의 영향을 고려한 단면유효강성을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 따라서, 철근콘크리트 원형교각의 내진구조해석시 유효강성은 아래와 같이 설계지진력을 계산할 경우와 설계변위를 계산할 경우로 구분하여 사용하는 것이 합리적일 것이다. 그림 13은 실험결과의 유효강성과 제안된 유효강성식을 나타내고 있다.

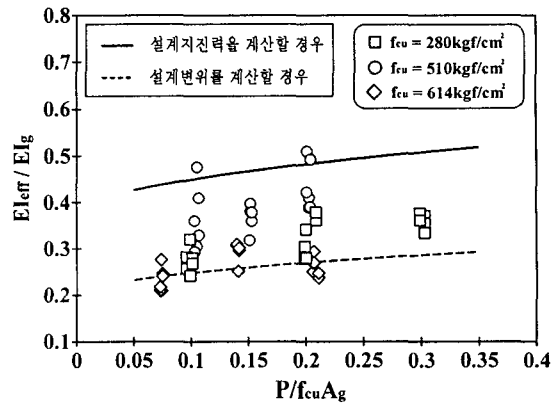


그림 13 제안된 유효강성식

- 설계지진력을 계산할 때의 유효강성식 :

$$E_c I_{eff} = (0.32 \gamma + 8.75 \rho + 0.25 \sqrt{\frac{P}{f_{ck} A_g}}) E_c I_g \quad (3)$$

- 설계변위를 계산할 때의 유효강성식 :

$$E_c I_{eff} = (0.16 \gamma + 5.02 \rho + 0.17 \sqrt{\frac{P}{f_{ck} A_g}}) E_c I_g \quad (4)$$

## 5. 결 론

1. 국내 도로교설계기준은 교각의 유효강성  $E_c I_{eff}$ 에 대해 내진설계기준이 명확하지 않기 때문에 실무에서는 전단면강성  $E_c I_g$ 을 사용하여 설계지진력을 과대 평가하고 있으며, 설계변위를 검토시 과소 평가하여 비안전측으로 설계되고 있다.
2. 설계지진력을 계산할 때에는 휨에 의한 영향만을 고려한 단면유효강성으로 적용하며, 설계변위를 계산할 때에는 휨에 의한 변형의 영향과 종방향철근의 슬립에 의한 변형의 영향을 고려하여 설계할수 있도록 최적의 변수를 선택하여 합리적인 유효강성식을 제안하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 '99년도 특정기초연구과제(과제번호 1999-1-311-004-3)의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김광수(2001) 고강도콘크리트 원형나선 철근교각의 내진성능에 관한 실험적 연구, 영남대학교, 석사사학위논문.
- 이재훈, 배성용, 윤석구(2001) 나선철근교각의 내진성능실험, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 21권 1-A호, pp 109 - 121.
- 한국건설교통부(2000) 도로교설계기준.
- Caltrans(1998) *Bridge Design Specification Manual*, California Department of Transportation, Division of Structures, Sacramento, California, USA.