

# 원형 철근콘크리트 교각의 연성도 내진설계

## Ductility Based Seismic Design of Circular R/C Bridge Piers

최진호\*

고성현\*\*

황정길\*\*\*

이재훈\*\*\*\*

Choi, Jin Ho

Ko, Seong Hyun

Hwang, Jung Kil

Lee, Jea Hoon

---

### ABSTRACT

This study is to develop detailing guidelines based on ductility demand for reinforced concrete bridge columns in areas of low to moderate seismicity. The current seismic design criteria of the Korea Design Specifications for Highway Bridge (KDSHB 2005) adopted the seismic design concept and requirements of the AASHTO specifications. In order to obtain full ductile behavior under seismic loads, i.e. when applied seismic force is larger than design flexural strength of column section, a response modification factor ( $R=3$  or  $5$ ) is used. In moderate seismicity regions, however, adopting the full ductility design concept sometimes results in construction problems due to reinforcement congestion. The objective of this paper is to suggest a new simplified seismic design of reinforced concrete bridge columns for moderate seismicity regions.

---

### 1. 서론

1992년도 도로교표준시방서에 내진설계편이 제정되어 교량에 대한 내진설계가 시행된 이후 많은 시공현장에서 발생하는 문제점으로 인하여, 미국의 강진지진지역에 대한 AASHTO 내진설계기준을 바탕으로 제정된 우리나라의 도로교 내진설계기준이 과연 우리나라의 실정에 부합하는지에 대한 의문이 대두되어 왔다. 현장에서 느끼는 이와 같은 의문은 철근콘크리트 교각에 과도하게 배근되는 횡구속철근으로 인하여 현장시공에 어려움을 겪고 있다는 점에서부터 시작되었다. 이러한 문제점은 철근콘크리트 교각의 내진설계 개념과 설계기준을 합리적으로 반영하지 못한 설계가 수행되고 있기 때문이기도 하지만, 현행 도로교설계기준의 내진설계규정이 완전연성(full ductility) 설계개념을 채택하고 있기 때문이다. 이에 대한 국내의 많은 연구자들의 연구결과가 바탕이 되어, 우리나라와 같은 중진지역의 경우에는 교각의 소요연성도를 고려한 한정연성도 내진설계법이 보다 합리적인 설계법으로 인식되고 있으며, 이에 관한 설계기준 정립의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 연구는 원형철근콘크리트 교각의 내진설계에 실무 적용을 위한 연성도 내진설계의 방법론을 제시함으로써 경제성 및 균일 안전성을 고려한 설계결과를 제공하고자 한다.

---

\*정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\*\*정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

## 2. 연성도에 기초한 내진설계

연성도 내진설계법은 연성도를 직접적으로 고려하는 설계법으로 기존의 응답수정계수인 R값을 상수(R=3 또는 5)로 적용하는 것이 아니라 소요연성도에 따라 변수로 적용하여 필요한 만큼 심부구속철근량을 변화시키는 것이 핵심이다. 따라서, 그림 1에 나타난 것처럼 구조해석과 단면해석을 수행하여 탄성 지진모멘트와 설계휨강도를 결정할 수 있다.

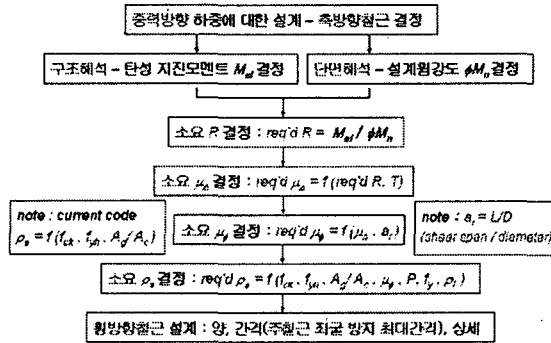


그림 1. 연성도 내진설계 과정

### 2.1 소요변위연성 결정

산정된 소요응답수정계수 ( $req'd R$ )에 변위연성도-응답수정계수 상관계수  $\lambda_{DR}$ 를 적용하여 식 (1)과 같이 소요변위연성도 ( $req'd \mu_{\Delta}$ )를 결정한다. 변위연성도-응답수정계수의 상관계수  $\lambda_{DR}$ 은 교각의 주기(T)에 따른 변위연성도( $\mu_{\Delta}$ )와 응답수정계수(R)의 상관관계를 고려하기 위한 계수로서, 주기(T)가  $1.25 T_s$  ( $T_s$ 는 통제주기)보다 큰 장주기(long period)인 경우에는 식 (2)와 같이  $\lambda_{DR} = 1.0$ 을 사용하고 주기(T)가  $1.25 T_s$ 보다 작은 단주기(short period)인 경우에는 식 (3)을 사용하여  $\lambda_{DR}$ 을 결정한다.

$$req'd \mu_{\Delta} = \lambda_{DR} \cdot req'd R \quad (1)$$

$$T > 1.25 T_s \rightarrow \lambda_{DR} = 1.0 \quad (2)$$

$$T < 1.25 T_s \rightarrow \lambda_{DR} = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \frac{1.25 T_s}{T} + \frac{1}{R} \quad (3)$$

### 2.2 소요곡률연성 결정

산정된 소요변위연성도 ( $req'd \mu_{\Delta}$ )에 손혁수 등이 제안한 식 (4)의 곡률연성도-변위연성도 상관식을 적용하여 소요곡률연성도 ( $req'd \mu_{\phi}$ )를 결정한다.

$$\mu_{\phi} = \frac{\mu_{\Delta} - 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left( \frac{D}{L} \right) \right\}}{0.13 \left( 1.1 + \frac{D}{L} \right)} \quad (4)$$

### 2.3 소요심부구속철근량( $\rho_s$ ) 산정

소요횡구속철근량  $\rho_s$ 는 손혁수 등이 제안한 식 (5)~(8)을 적용하여 결정한다. 이 식들은 원형단면에 대한 연구결과로 제안된 식이다. 식 (5)에서  $f_{ck}$ 는 콘크리트 설계압축강도,  $f_{yh}$ 는 횡방향철근의 설

계항복강도,  $A_g$ 는 기둥의 전체단면적,  $A_c$ 는 기둥의 심부단면적이다. 식 (6)의  $\alpha$ 는 소요곡률연성도와 기둥의 축력비를 고려한 값이며, 식 (7)의  $\beta$ 는 MPa 단위의 축방향철근의 설계항복강도  $f_y$ 를 고려한 값이다. 식 (8)의  $\gamma$ 는 축방향철근비를 고려한 값이다.

$$\rho_s = 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \cdot \alpha \cdot \beta + \gamma \quad (5)$$

$$\alpha = \left[ 3(\mu_\phi + 1) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 0.8\mu_\phi - 3.5 \right] \quad (6)$$

$$\beta = \frac{f_y}{350} - 0.12 \quad (7)$$

$$\gamma = 0.1(\rho_l - 0.01) \quad (8)$$

#### 2.4 횡방향철근 설계

횡방향철근은 심부콘크리트 구속효과 및 축방향철근의 좌굴 방지를 위해 수직간격을 제한할 필요가 있다. 따라서, 식 (9)와 같이 횡방향철근 지름은 축방향철근 지름의 0.5이상으로 규정하며 횡방향철근 간격은 식 (10)과 같이 축방향철근 지름의 6배 이하로 제한한다.

$$d_{bt} \geq 0.5 \cdot d_{bl} \quad (9)$$

$$s \leq 6 \cdot d_{bl} \quad (10)$$

### 3. 경제성 및 안전성평가

본 연구에서 제안하고 있는 연성도 내진설계법과 현행 도로교설계기준인 단면력 내진설계법의 경제성 및 안전성에 대한 비교 분석을 위해 표 1과 같은 설계 제원을 가진 교량의 교각에 대한 내진설계를 비교 분석하였다. 연성도 내진설계법과 현행 도로교설계기준으로 산정된 상부구조 중량에 따른 횡방향철근 양에 대한 비율을 보면 표 2에 나타난 것 과 같고 상부구조 중량이 30ton/m 이하인 경우 제안된 연성도 내진설계법은 현행 설계기준의 약 30~84% 양으로 배근되기 때문에 경제적인 설계를 유도할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 캔틸레버 교량 형식에 대해서 현행 기준은 R=3을 사용하기 때문에 상부구조 중량은 33ton/m 까지 설계가 가능하며 그 이상인 경우 단면을 키워야 한다.

표 1. 설계제원

I. 재료강도 및 제원	II. 교량 및 교각의 형식 및 제원	III. 지진하중: 도로교설계기준 적용
-콘크리트 압축강도, $f_{ck}=27$ MPa -철근 항복강도, $f_{yk}=f_{yh}=400$ MPa -축방향 철근: D35 -횡방향 (나선)철근: D22 또는 D19	-1점 고정단 4경간 연속교 -경간: 50m, 교각높이: 8m -단면지름: 2.4m (전단형상비 4.0) -형식: 원형 캔틸레버 T-형교각 -축방향철근비: 0.0152(72-D35)	- 내진 1등급 (지반계수= 1.2)

표 2. 상부구조 중량에 따른 횡방향철근 양에 대한 비율

상부중량 W [ton/m]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
횡철근 비율 (제안/현행)	2.06 (탄성)	0.30	0.37	0.52	0.69	0.84	0.98	1.13	1.29	1.44

현행설계법과 연성도 내진설계법으로 설계하고 지진해석에 의해 계산된 교각 상단변위를 그림 3에 나타내었다. 상부구조 중량이 증가함에 따라 소요변위( $\Delta_{u,req'd}$ )는 증가하기 때문에 교각의 변위성능도

증가하여야 한다. 그러나, 현행 설계법으로 배근된 교각의 변위성능(capacity)은 상부구조 중량이 증가함에 따라 변위성능이 감소하는 것으로 나타난다. 하지만 연성도 내진설계법으로 배근된 교각의 변위성능(capacity)은 증가하는 것으로 나타난다. 또한, 소요변위(demand)인  $\Delta_{u,req'd}$ 에 대한 각각의 변위성능(capacity) 비율로 안전율을 분석하면 그림 4에 나타낸 것처럼 현행 설계법의 경우 소성설계 시 안전율에 대한 편차는 1.21~4.14로 나타나고 연성도 내진설계의 경우 안전율에 대한 편차는 1.38~2.89로 나타남에 따라 안전율에 대한 편차가 줄어드는 것으로 나타난다.

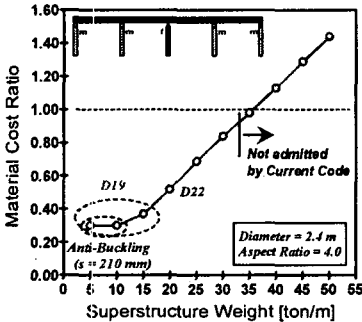


그림 2. 횡방향 철근 재료비 비율

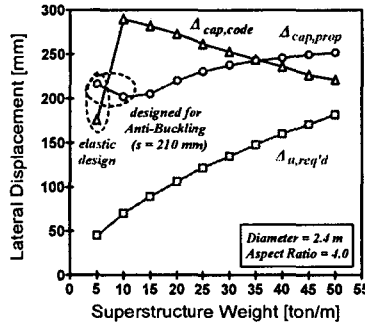


그림 3. 상부 중량에 따른 변위 성능

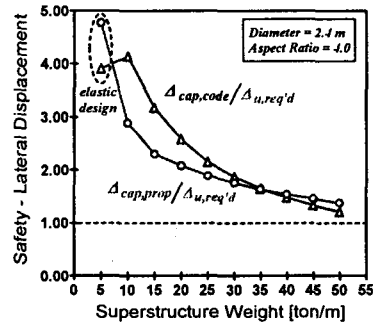


그림 4. 변위성능에 대한 안전율 편차

#### 4. 결론

본 연구는 원형철근콘크리트 교각의 합리적인 내진설계법 개발을 위해 현행 설계법과 연성도 내진설계법으로 교각설계에 대한 경제성 및 안전성 분석을 하였고, 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 연성도 내진설계법은 응답수정계수인 R값을 변수로 적용하여 소요연성도에 따라 횡방향철근이 배근되므로 캔틸레버 교량 형식에 대해서는 상부구조 중량이 30ton/m 이하인 경우 심부구조철근량은 현행 설계법의 30~84% 수준으로 설계되므로 경제성 및 시공성이 개선될 것으로 판단된다.
2. 현행 도로교설계기준은 철근콘크리트 교각의 내진설계 시 응답수정계수를 상수로 적용하기 때문에 상부구조 중량이 증가함에 따라 변위성능(capacity)이 감소하지만, 연성도 내진설계법은 변위성능(capacity)이 증가한다. 때문에, 현행 설계기준에서는 소성설계시 변위성능(안전성)의 편차가 크게 나타나는 것으로 판단된다.
3. 소성설계시 현행 설계법의 경우 안전율에 대한 편차는 1.21~4.14로 나타나고 연성도 내진설계의 경우 안전율에 대한 편차는 1.38~2.89로 나타남에 따라 안전율에 대한 편차가 저감 되어 균일한 안전성을 제공하는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. ATC/MCEER, "Recommended LFRD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges," Recommended to AASHTO, 2001.
2. CALTRANS, "Seismic Design Criteria," Version 1.3, 2004.
3. Lee, Jae-Hoon and Son, Hyeok-Soo, "Relationship between Ductility and Confinement Steel in RC Bridge Column Assessment and Design", KEERC-MCEER Joint Seminar on Contributions to Earthquake Engineering, Buffalo Marriott Hotel, Buffalo, July 30 - August 1, 2002.