

# 철근콘크리트 교각의 연성요구량에 따른 내진설계

## Ductility Demand based Seismic Design for RC Bridge Columns

이 재 훈\*      손 혁 수\*\*      고 성 현\*\*\*      최 진 호\*\*\*\*  
Lee, Jae Hoon    Son, Hyeok Soo    Ko, Seong Hyun    Choi, Jin Ho

### ABSTRACT

The current seismic design criteria of the Korea Design Specifications for Highway Bridge (KDSHB 2000) 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 is used. For the moderate seismicity regions, a design based on required ductility and required transverse reinforcement might be a reasonable approach. Ductility demand design or performance based design might be an appropriate approach especially for regions of moderate seismic risk. The procedure and application of this design approach are presented in this paper.

### 1. 서론

교량 구조물의 경우, 교각의 붕괴는 교량 전체의 붕괴로 이어질 우려가 있으므로 설계지진력에 대하여 교각이 취성파괴를 일으키지 않고 충분한 내하력과 변형성능을 발휘할 수 있는 연성파괴를 유발하도록 설계되어야 한다. 세계 각국의 내진설계 기준에서 채택하고 있는 내진설계의 원리는 지진에 저항하기 위해서 구조물은 일정한 수준의 강도를 가져야 하는데, 매우 큰 지진에 대해서도 견디기 위한 강도를 확보하기 위해서는 경제적인 부담이 지나치게 커지기 때문에 과도한 지진력을 받을 경우 구조물이 큰 변형을 일으키며 붕괴되지 않고 지진력에 저항할 수 있는 연성능력을 가지도록 하여 구조물의 비선형 거동을 통한 에너지 소산효과를 이용하는 것이다. 설계지진력 작용시 완전한 연성거동(full ductile behavior)을 확보하기 위해 각국의 내진설계 기준에 심부구속철근량을 규정하고 있으며, 우리나라의 경우에도 도로교설계기준(2000)에 심부구속철근량에 관한 기준이 정의되어 있다. 하지만, 국내 설계기준은 강진지역의 설계기준(AASHTO)을 모방한 것으로서 중·약진 지역에 속하는 국내에 그대로 적용하는 경우 과도하게 배근되는 심부구속철근

\* 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수

\*\* 영남대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

\*\*\* 영남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 영남대학교 토목공학과 석사과정

으로 인한 시공상의 문제가 발생하는 등 현행 실무에서 많은 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 국내와 같은 중·약진지역의 내진설계시 합리적으로 적용할 수 있는 연성도를 고려한 철근콘크리트 교각의 내진설계방법을 제안함으로써, 향후 국내 교각의 내진설계 지침에 관한 참고자료를 제공하고자 한다.

## 2. 철근콘크리트 교각 내진설계에 관한 국내현황

우리나라를 포함한 세계 각국의 내진설계 기준에서는 지진하중 작용시 교각 구조물의 연성능력을 확보하기 위해 심부구속철근량 산정식을 정의하고 있으며 설계기준별 심부구속철근량 산정식에서 고려하고 있는 변수들은 약간의 차이가 있다. 설계기준별 심부구속철근량 산정식의 주요변수를 비교하면 콘크리트 압축강도, 심부구속철근의 항복강도, 단면적과 심부콘크리트 단면적의 비율 등은 모든 설계기준에서 공통으로 고려하고 있으나, 철근콘크리트 교각의 내진거동에 중요한 영향을 미치는 축력비, 소요연성도 등과 같은 변수들은 일부 외국의 설계기준에서만 고려하고 있다. 도로교설계기준(2000)<sup>[1]</sup>과 AASHTO<sup>[2]</sup>의 경우 재료강도 및 단면적과 심부콘크리트 면적의 비율만을 변수로 고려하고 있지만 Caltrans<sup>[6]</sup>, ATC-32<sup>[5]</sup>, Eurocode 8<sup>[7]</sup>, NZS 3101<sup>[8,9]</sup> 등의 설계기준은 모두 심부구속철근량 산정식에 축력의 영향을 고려하고 있으며 특히, Eurocode 8, NZS 3101의 경우에는 축력의 영향 이외에 곡률연성을 변수로 고려하고 있어 다른 설계기준에 비해 다소 합리적인 식의 형태를 나타내고 있다. 국내 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 미국 AASHTO의 설계기준을 적용한 것으로서 우리나라는 중·약진지역에 속함에도 불구하고 다른 외국의 경우보다 더 많은 심부구속철근량을 배근하도록 규정되어 있다. AASHTO를 비롯한 대부분의 외국 강진지역의 설계기준은 지진하중 작용시 완전연성거동(full ductile behavior)을 확보하기 위한 것으로서 그림 1(a)와 같이 응답수정계수( $R=3$  또는  $R=5$ )를 적용하여 설계지진력 작용시 교각에 작용하는 하중이 단면의 공칭강도 이하가 되도록 하며, 나선철근 교각의 경우 식 (1)과 식 (2) 중 큰 값 이상을 사용하여 심부구속철근량을 설계하도록 되어 있다. 하지만, 국내의 경우에는 교각 받침상세의 영향에 의한 단면의 과다설계로 인하여 그림 1(b)와 같이 설계지진력에 의한 작용하중이 단면의 공칭강도 이상이지만 그 차이가 크지 않은 경우가 많으며, 이러한 경우 전술한 바와 같은 일반적인 설계방법을 적용하는 경우 과도하게 안전측인 설계가 수행되어 비경제적인 설계결과를 초래할 수도 있을 것이다.

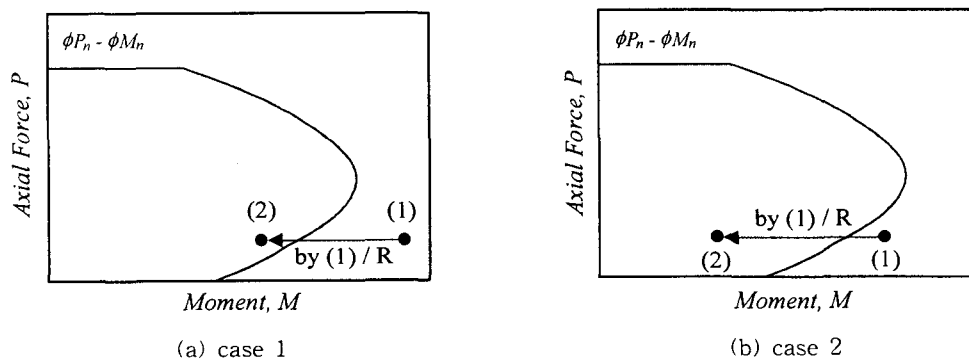


그림 1 응답수정계수를 적용한 철근콘크리트 교각의 내진설계 개념

$$\rho_s = 0.45 \left[ \frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (1)$$

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad (2)$$

### 3. 연성도를 고려한 내진설계방법의 제안

본 연구에서 제안하고자 하는 연성도를 고려한 철근콘크리트 교각의 내진설계방법은 기존의 획일적인 내진설계법과는 달리 대상구조물의 소요역량곡선과 공급역량곡선을 이용하여 소요연성도를 산정한 후 연성요구량에 따라 교각의 심부구속철근량을 결정하는 방법이다. 연성도를 고려한 내진설계방법은 현재 각국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 성능기초내진설계(performance based seismic design)에 근거를 둔 것으로서 본 연구에서 제안하고자 하는 내진설계방법은 다음과 같다.

- 1) 대상구조물의 소요역량곡선(하중-변위 곡선 또는 가속도-응답변위 곡선) 구성
- 2) 교각 단면 및 축방향철근 결정
- 3) 교각의 공급역량곡선(하중-변위 곡선 또는 가속도-응답변위 곡선) 구성
  - ① 항복유효강성(yielding effective stiffness)의 계산
  - ② 설계공칭강도(design nominal strength)의 계산
  - ③ 공급역량곡선(하중-변위 곡선 또는 가속도-응답변위 곡선) 구성
- 4) 소요변위연성도(required displacement ductility) 결정

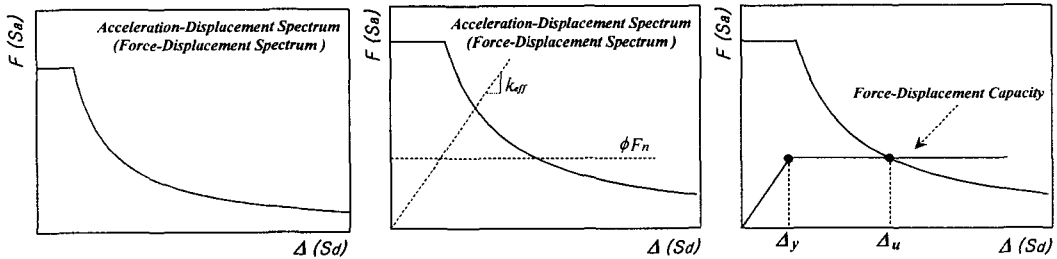
$$req'd \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

- 5) 소요곡률연성도(required curvature ductility) 결정

$$req'd \mu_{\phi} = f(\mu_{\Delta}, \frac{L}{D}) \quad (2)$$

- 6) 소요심부구속철근량(required transverse reinforcement) 결정

$$req'd \rho_s = f(\mu_{\phi}, P, f_{ck}, f_y, f_{yh}, \rho_l) \quad (3)$$



(a) 소요역량곡선 구성 (b) 유효강성 및 공칭강도 계산 (c) 소요변위연성도 산정

그림 2 연성도를 고려한 철근콘크리트 교각의 내진설계방법 과정

### 3.1 항복유효강성의 결정

항복유효강성의 계산은 철근콘크리트 교각 단면의 모멘트-곡률 비선형해석을 통하여 결정할 수 있으며, 비선형해석이 어려운 경우에는 철근콘크리트 교각의 내진성능실험 및 비선형해석결과를 통하여 이재훈 등<sup>[3]</sup>이 제안한 다음의 식 (4)와 같은 항복유효강성식을 사용하여 간편하게 결정할 수 있다.

$$I_{eff} = \left( 0.16 + 12 \rho_l + 0.3 \sqrt{\frac{P}{f_c' A_g}} \right) I_g \quad (4)$$

### 3.2 소요곡률연성도의 결정

철근콘크리트 교각의 연성은 일반적으로 단면의 곡률연성과 부재의 변위연성으로 나타낼 수 있다. 철근콘크리트 기둥의 경우 단면의 특성 및 작용하중 등의 여러 가지 요인에 의해 그 거동특성이 달라지게 되며 실험을 통하여 연성도를 직접 구할 수 없는 경우에는 곡률연성의 산정을 위해서는 모멘트-곡률 곡선의 해석, 변위연성의 산정을 위해서는 하중-변위 곡선의 해석이 필요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기둥단면에 대한 모멘트-곡률 해석과 횡하중-횡변위 해석을 수행한 후 실험결과와의 비교, 분석을 통하여 실제거동을 합리적으로 예측할 수 있는 비선형해석 프로그램 [NARCC]<sup>[2]</sup>를 개발하여 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 정립하고 곡률연성과 변위연성의 상관식을 제안하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발한 철근콘크리트 교각의 비선형해석 프로그램 [NARCC]의 비교, 분석 및 검증에 위하여 표 1과 같은 나선철근 및 원형띠철근 기둥에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 본 연구에서 개발한 비선형해석 프로그램 [NARCC]는 시험체의 실제거동을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 분석되었으며, 축력비 및 콘크리트 강도가 증가할수록 안전측인 해석결과를 제공하는 경향을 나타내었다.

표 1 나선철근 및 원형띠철근 기둥 시험체 상세

시험체명	D [cm]	L/D	f <sub>ck</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	f <sub>y</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	f <sub>yh</sub> [kgf/cm <sup>2</sup> ]	ρ <sub>l</sub> [%]	ρ <sub>s</sub> [%]	s [cm]	P/f <sub>ck</sub> A <sub>g</sub> [%]	심부구속 철근
CN-SP-80-10	40	4.25	280	3,569	3,712	1.26	0.99	8.0	9.9	나선
CN-SP-80-30	40	4.25	280	3,569	3,712	1.26	0.99	8.0	29.9	나선
CNH-SP-80-20	40	4.25	280	3,569	3,712	3.23	0.99	8.0	20.4	나선
CNH-SP-100-20	40	4.25	280	3,569	3,712	3.23	0.79	10.0	20.4	나선
CH-SP-45-14	40	3.50	612	4,334	4,201	1.26	0.80	4.5	14.1	나선
MS-HT5-N-L2	120	4.0	253	3,385	3,763	1.01	0.39	11.5	6.6	원형 띠철근

D : 단면직경, L/D : 형상비, f<sub>ck</sub> : 콘크리트 강도, f<sub>y</sub> : 축방향철근 항복강도, f<sub>yh</sub> : 심부구속철근 항복강도, ρ<sub>l</sub> : 축방향철근비, ρ<sub>s</sub> : 심부구속철근비, s : 심부구속철근 수직간격, P/f<sub>ck</sub>A<sub>g</sub> : 축력비

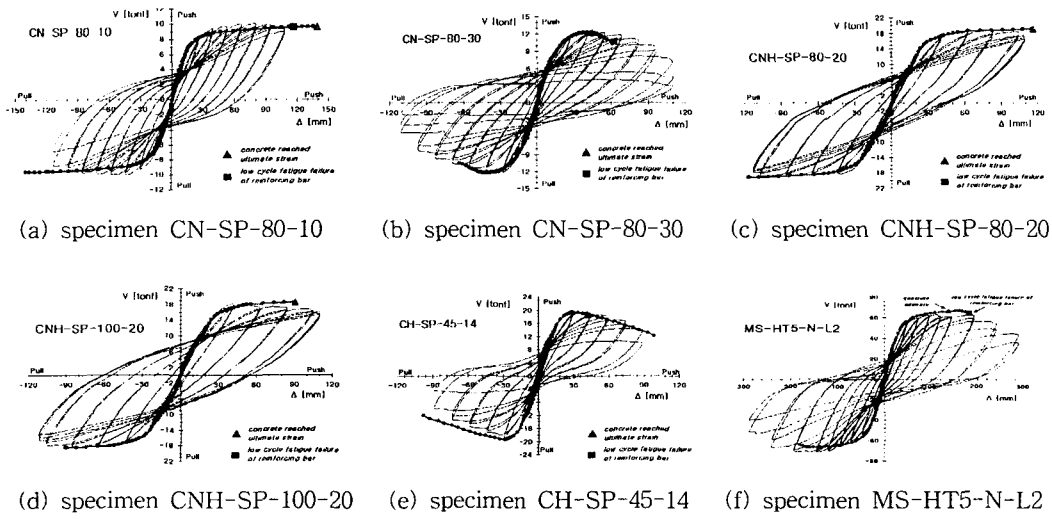


그림 3 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용한 해석결과와 실험결과의 비교

소요곡률연성도의 산정은 대상교각의 공급역량곡선과 소요역량곡선을 중첩하여 소요변위연성도를 결정한 후, 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 사용한 변수연구를 통해 제안된 다음의 식 (5)를 이용하여 소요곡률연성도를 결정할 수 있다.

$$req'd \mu_{\phi} = \frac{req'd \mu_{\Delta} - 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left( \frac{D}{L} \right) \right\}}{0.13 \left( 1.1 + \frac{D}{L} \right)} \quad (5)$$

### 3.3 소요심부구속철근량의 결정

소요곡률연성도가 결정되면 곡률연성을 주요변수로 포함한 심부구속철근량 산정식을 사용하여 심부구속철근량을 결정할 수 있다. 연성도를 고려한 소요심부구속철근량의 결정은 다음의 식 (6)을 이용하여 결정할 수 있으며, 식 (6)은 연성도를 고려한 심부구속철근량 산정식으로서 철근콘크리트 교각의 내진성능실험 및 해석결과를 토대로 한 변수연구를 통하여 제안된 식<sup>[2]</sup>으로서 기존의 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식에 비해 축력, 축방향철근비, 축방향철근의 항복강도 및 곡률연성을 변수로 포함한 보다 합리적인 심부구속철근량 산정식이라고 볼 수 있다.

$$\rho_s = 0.014 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left\{ \frac{A_g}{A_c} - 0.6 \right\} \cdot \alpha \cdot \beta + \gamma \geq \frac{1}{1.5} \frac{A_{sp}}{d_b D_{sp}} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \left[ 3(\mu_{\phi} + 1) \frac{P}{f_{ck} A_g} + 0.8 \mu_{\phi} - 3.5 \right] \quad (7)$$

$$\beta = \left\{ \frac{f_y}{3,500} - 0.12 \right\} \quad (8)$$

$$\gamma = 0.1(\rho_l - 0.01) \quad (9)$$

#### 4. 결 론

본 연구에서는 연성도를 고려한 철근콘크리트 교각의 내진설계방법을 제안하였으며, 제안된 내진설계방법은 기존의 획일적인 내진설계방법과는 달리 대상교각의 소요연성도에 따라 심부구속철근량을 결정하는 방법으로 보다 합리적인 내진설계방법이라고 할 수 있다. 이는 현재 각국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 성능기초내진설계에 근거한 것으로서 향후 국내 철근콘크리트 교각의 내진설계에 관한 설계기준 개정시 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
2. 손혁수, 심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구, 박사학위논문, 영남대학교, 2002. 8.
3. 이재훈, 배성용, “철근콘크리트 원형교각의 설계지진력 해석시의 항복유효강성”, 대한토목학회논문집, 제 21권 5-A호, 2001년 9월, pp 719 - 728.
4. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, *American Association of State Highway and Transportation Officials. 16-th edition*, Washington, D.C. 1995.
5. ATC-32, *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, Applied Technology Council, California, USA, 1996.
6. Caltrans, *Bridge Design Specifications*, California Department of Transportation, Sacramento, January, 1993.
7. Eurocode 8 Part 2, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*, European Committee for Standardization, 1996.
8. New Zealand Standard., *Concrete Structures Standard - Part 1 : Design of Concrete Structures*, NZS 3101, 1995.
9. New Zealand Standard., *Concrete Structures Standard - Part 2 : Commentary on the Design of Concrete Structures*, NZS 3101, 1995