

철근콘크리트 원형교각의 연성도 상관관계에 관한 연구

Relationship between Curvature Ductility and Displacement Ductility of RC Bridge Circular Columns

손혁수* 조재원** 이재훈***
Hyeok-Soo Son Jae-Won Jo Jae-Hoon Lee

ABSTRACT

The flexural ductility capacity of reinforced concrete columns can be expressed either in terms of curvature ductility or displacement ductility. To evaluate ductility capacity of reinforced concrete columns, analytical models and a non-linear analysis program, NARCC have been developed, which is applicable to the RC columns subjected to seismic loading. The analytical results by using computer program NARCC are in good agreement with the test results. In order to develop relationships between the curvature ductility and the displacement ductility, the analysis for total 21,600 RC circular columns using the computer program NARCC have been carried out for parametric studies. Based on the results from the parametric studies, a correlation equation between the curvature ductility and the displacement ductility was developed.

1. 서론

철근콘크리트 교각의 연성능력은 일반적으로 단면의 곡률연성(curvature ductility)과 부재의 변위연성(displacement ductility)으로 나타낼 수 있다. 철근콘크리트 기둥의 연성은 후탄성(post-elastic)영역에서 현저한 강도감소 없이 큰 변형을 일으킬 수 있는 능력을 의미하는 것으로서, 지진하중과 같은 반복하중을 받는 구조물의 내진설계 및 내진성능 평가시 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 철근콘크리트 구조물에서의 연성은 부재 또는 단면을 구성하고 있는 여러 가지 변수에 의해서 좌우되며, 철근콘크리트 교각의 연성에 영향을 미치는 주요인자들은 콘크리트 압축강도, 축방향철근 항복강도, 심부구속철근 항복강도, 축방향철근비, 콘크리트의 극한변형률, 심부구속철근비, 축력비 등을 들 수 있다. 즉, 철근콘크리트 교각의 연성은 다양한 변수들에 의해 복합적으로 영향을 미치지만 현행 도로교설계기준(2000)의 심부구속철근량 산정식은 일부 특정변수(재료강도 및 단면적 비율)만을 고려한 식의 형태로 구성되어 있으며, 특히 우리나라와 같은 중·약진 지역에서는 보다 합리적인 심부구속철근량 산정식의 필요성이 절실히 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 연성도를 고려한 합리적인 심부구속철근량 산정식

* 정회원, 영남대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

** 정회원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수

을 제안하기 위한 선행연구로서 원형단면 철근콘크리트 교각의 내진성능 실험결과를 이용하여 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 합리적으로 예측할 수 있는 비선형해석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 비선형해석 프로그램을 이용한 총 21,600개의 원형단면 철근콘크리트 교각에 대한 변수연구(parametric study)를 수행하여 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 분석하였으며, 분석결과를 이용한 곡률연성과 변위연성의 상관식을 제안하였다.

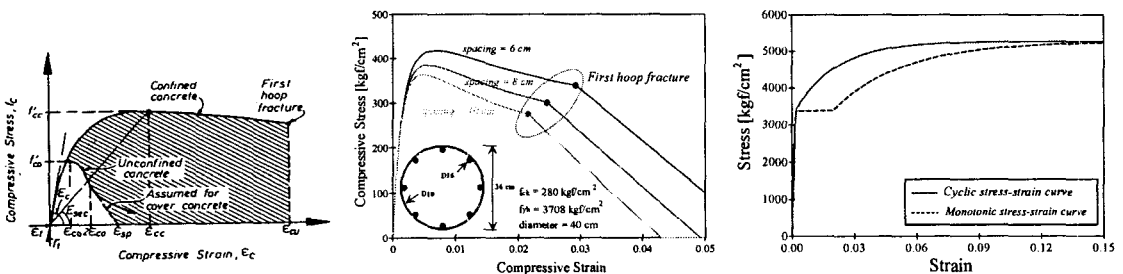
2. 비선형해석 프로그램의 개발

철근콘크리트 기둥의 경우 단면의 특성 및 작용하중 등의 여러 가지 요인에 의해 그 거동특성이 달라지게 되며 합리적인 설계를 위해서는 근본적으로 대상 구조물의 모멘트-곡률 관계 및 하중-변위 관계를 구성하는 것이 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]를 개발하였으며, 그 주요내용은 다음과 같다.

2.1 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 곡선 모델

그림 1(a)는 Mander 등이 제안한 구속콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로서, 극한변형률(first hoop fracture) 이상의 콘크리트 응력을 고려하는 경우, 변형률의 증가에 따라 콘크리트의 응력이 서서히 감소하는 형태를 나타낸다. 즉, 극한변형률 이후의 콘크리트 응력으로 Mander 등이 제안한 구속콘크리트 모델을 그대로 적용하는 경우에는 모멘트-곡률 및 하중-변위 해석에서 최대하중 이후 하중이 감소하는 곡선의 하강부를 예측하기에는 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 최대하중 이후의 곡선의 하강부를 실제거동과 유사하게 예측하기 위해 그림 1(b)와 같이 Mander 등이 제안한 모델을 일부 수정하여 극한변형률 이상의 변형률에 대해서는 변형률이 증가함에 따라 구속콘크리트의 응력이 직선적으로 감소하는 것으로 가정한 수정 Mander 모델^[1]을 적용하였다. 철근의 응력-변형률 곡선 모델의 경우 반복하중의 영향을 고려하기 위해 Shima 등^[7]의 단조하중에 대한 모델을 기본으로 그림 1(c)와 같은 반복하중의 영향을 고려한 철근의 응력-변형률 곡선^[1]을 적용하였으며, 항복변형률 이후 곡선의 구성방정식은 식(1)과 같다. 식(1)의 계수 k 는 항복이후 비탄성구간의 곡선의 기울기를 결정하는 계수로서 실험결과 및 해석결과를 분석을 통하여 결정된 계수이며, 철근의 항복강도가 3,000 kgf/cm²인 경우 0.02를 4,000 kgf/cm²인 경우는 0.01을 사용한다.

$$\epsilon_y \leq \epsilon_s \text{ 인 경우, } f_s = f_y + (f_{su} - f_y) [1 - e^{-(\epsilon_s - \epsilon_y)/k}] \quad (1)$$



(a) 구속콘크리트 모델 (Mander 등) (b) 수정 Mander 등의 모델 (c) 반복하중의 영향을 고려한 철근모델

그림 1 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 곡선 모델

2.2 모멘트-곡률 해석 및 하중-변위 해석

모멘트-곡률 해석은 그림 2에 나타난 것과 같이 일정한 콘크리트 압축연단의 변형률에 대해서 곡률을 변화시켜가며 내력과 외력이 일치하는 중립축을 찾는 방법(Rotating Plane Method)^[4]을 이용하여 콘크리트 압축연단의 변형률을 증가시키면서 반복계산을 수행하여 모멘트-곡률 곡선을 구성하였다.

하중-변위 곡선의 구성은 그림 3에 나타난 것과 같이 모멘트-곡률 분포를 수치적분을 통하여 동일한 변위를 발생시키는 등가강성(equivalent stiffness)을 이용하여 휨작용에 의한 변위를 계산하였으며, 축방향철근의 부착슬립 및 전단작용에 의한 기동상단의 추가적인 횡방향 변위를 고려하여 전체 횡방향 변위를 계산하였다.

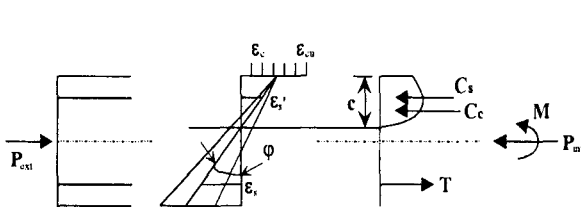


그림 2 Rotating Plane Method의 개념

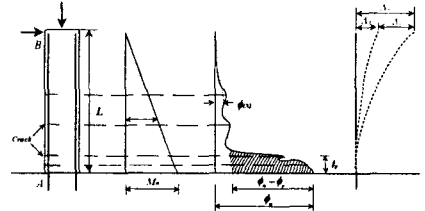


그림 3 수치적분법에 의한 휨변위의 계산

2.4 항복상태 및 극한상태의 정의

철근콘크리트 기둥의 연성은 항복변위(곡률)와 극한변위(곡률)를 이용하여 비교적 간단하게 연성도를 산정할 수 있지만, 항복상태 및 극한상태의 정의에 따라 그 값이 달라질 수 있으며, 아직까지 하나의 통일된 기준이 정립되지 못한 상태이다. 본 연구에서 적용한 항복상태의 정의^[3]는 그림 5와 같은 3가지 방법을 적용하였다.

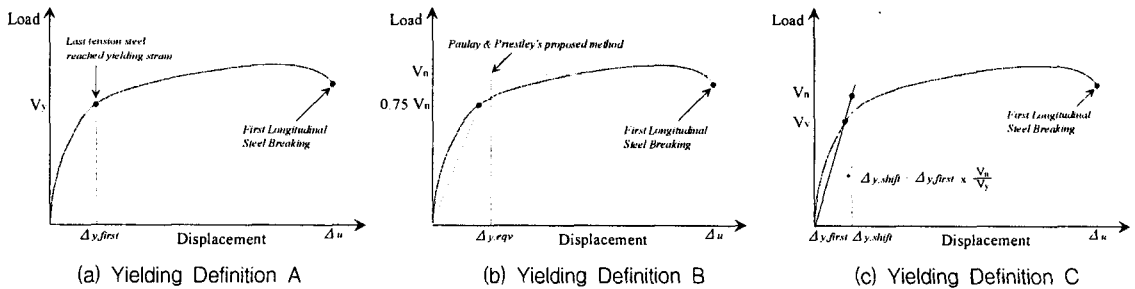


그림 5 항복상태의 정의

극한상태의 정의 역시 다양한 변수들의 영향에 의해 파괴모드가 달라지므로 아직까지 통일된 하나의 기준이 정립되지 못한 상태이지만, 대표적으로 심부콘크리트의 파괴 또는 축방향철근의 파단을 극한상태로 정의하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 안전측인 분석 및 일관성 있는 경향분석을 위해 극한상태의 기준을 콘크리트 변형률이 극한변형률에 도달한 상태를 극한상태로 정의하여 분석을 수행하였으며 콘크리트 극한변형률은 Mander 등^[3]이 제안한 다음의 식(2)를 사용하였다.

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2)$$

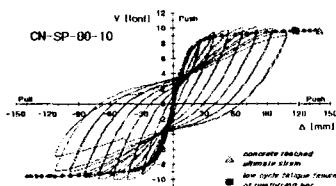
3. 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용한 해석결과와 실험결과와의 비교

본 연구에서 개발한 철근콘크리트 교각의 비선형해석 프로그램 [NARCC]의 비교, 분석 및 검증은 위하여 표 1과 같은 나선철근 및 원형띠철근 기둥^[2]에 대해 해석을 수행하였다. 그림 6은 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.

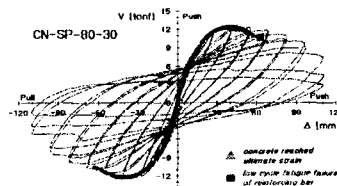
표 1 시험체 상세

시험체명	D [cm]	$\frac{L}{D}$	f_{ck} [kgf/cm ²]	f_y [kgf/cm ²]	f_{yh} [kgf/cm ²]	ρ_l [%]	ρ_s [%]	s [cm]	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$ [%]	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

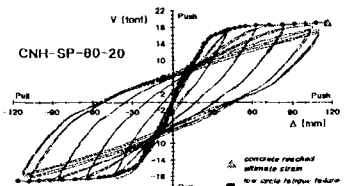
D : 단면직경, $\frac{L}{D}$: 형상비, f_{ck} : 콘크리트 강도, f_y : 축방향철근 항복강도, f_{yh} : 심부구속철근 항복강도, ρ_l : 축방향철근비, ρ_s : 심부구속철근비, s : 심부구속철근 수직간격, $\frac{P}{f_{ck}A_g}$: 축력비



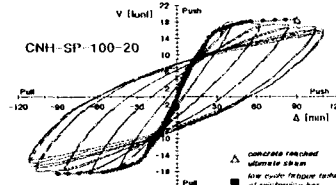
(a) specimen CN-SP-80-10



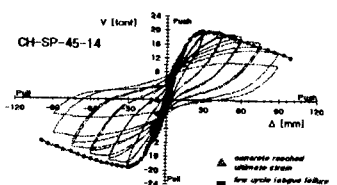
(b) specimen CN-SP-80-30



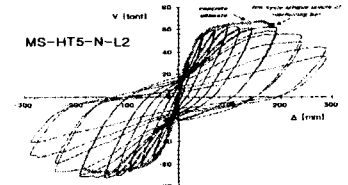
(c) specimen CNH-SP-80-20



(d) specimen CNH-SP-100-20



(e) specimen CH-SP-45-14



(f) specimen MS-HT5-N-L2

그림 6 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용한 해석결과와 실험결과와의 비교

4. 곡률연성과 변위연성의 상관관계 분석 및 상관식의 제안

곡률연성과 변위연성의 상관식을 제안하기 위해 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용하여 표 2와 같은 다양한 변수들의 조합에 대한 변수연구(parametric study)를 수행하였다.

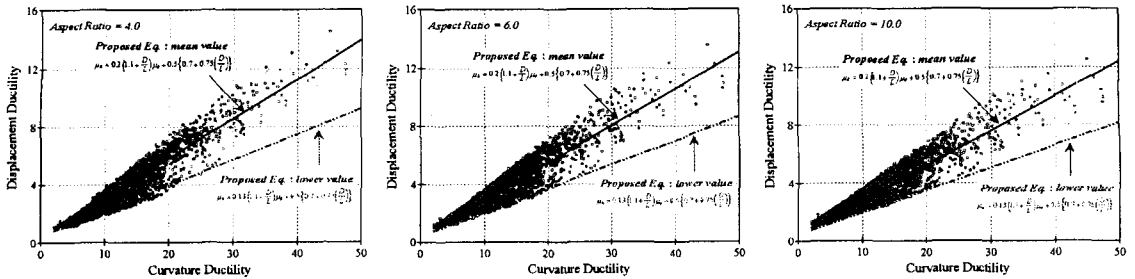
표 2 변수연구(parametric study)에 사용된 주요변수

변수명	변수조건	비고
단면형상	원형단면	나선철근
단면직경, D [cm]	100, 200	-
형상비, L/D	2, 3, 4, 5, 6, 10	-
항복상태 정의	A, B, C	그림 5 참조
콘크리트 강도, f_{ck} [kgf/cm ²]	200, 300, 400, 500, 600	-
축방향철근 및 심부구속철근 항복강도, f_y & f_{yh} [kgf/cm ²]	3,000, 4,000	-
축방향 철근비, ρ_l	1, 2, 3, 4 %	-
축력비, a	10, 20, 30 %	$a = P / (f_{ck}A_g)$
심부구속철근비, ρ_s	100, 75, 50, 25 % & 비내진	도로교설계기준(2000)에 의한 심부구속철근비 기준

곡률연성과 변위연성의 상관관계를 주요변수별로 비교, 분석한 결과 항복상태의 정의 기준, 축방향 철근비, 축력비, 심부구속철근 항복강도 등의 변화에 따라 곡률연성 및 변위연성의 값은 차이를 나타 내지만 전반적인 곡률연성과 변위연성의 상관관계는 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, 형상비의 변화에 대해서는 형상비가 증가함에 따라 동일한 곡률연성에서 변위연성은 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서, 곡률연성과 변위연성의 상관관계 분석 및 상관식을 제안하기 위하여 총 21,600개의 [NARCC] 프로그램 해석결과에 대해 통계분석 프로그램 SPSS 11.0을 사용하여 변위연성을 종속변수로 곡률연성을 독립변수로 선형회귀분석(linear regression analysis)을 수행하였다. 식(3)은 본 연구에서 수행한 해석결과의 회귀분석 결과에 의한 관계식을 나타낸 것으로서, 곡률연성과 변위연성 상관관계의 평균값에 해당하는 식이며 기존 교량의 내진성능평가를 위한 연성도를 산정하기 위해서는 평균값에 대한 제안식인 식(3)을 적용하는 경우 합리적인 평가결과를 제공할 수 있으나, 안전측인 설계 및 평가를 위해서는 하한값을 사용하는 것이 합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 해석결과의 calibration을 통하여 식(3)의 계수 0.2 대신 0.13을 사용한 식(4)를 곡률연성과 변위연성의 상관식으로 제안하였다. 그림 7은 형상비에 따른 곡률연성과 변위연성의 해석결과와 제안식을 비교하여 나타낸 것으로서, 제안식을 사용할 경우 안전측이며 합리적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

$$\mu_{\Delta} = 0.20 \left(1.1 + \frac{D}{L} \right) \mu_{\phi} + 0.5 \left\{ 0.7 + 0.75 \left(\frac{D}{L} \right) \right\} \quad (3)$$

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



(a) 형상비 4.0인 경우

(b) 형상비 6.0인 경우

(c) 형상비 10.0인 경우

그림 7 곡률연성 및 변위연성 상관관계 제안식과 해석결과의 비교

5. 결론

본 연구는 연성도를 고려한 합리적인 심부구속철근량 산정식을 제안하기 위한 선행연구로서 원형단면 철근콘크리트 교각의 내진성능 실험결과를 이용하여 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 합리적으로 예측할 수 있는 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 개발하였으며, 철근콘크리트 기둥의 내진거동에 영향을 미치는 다양한 변수들의 조합에 대하여 비선형해석 프로그램 [NARCC]를 이용한 변수연구를 수행한 결과, 항복상태의 정의 기준에 따라 연성도의 크기는 달라지지만 곡률연성과 변위연성의 전반적인 상관관계는 유사한 경향을 나타내었으며, 해석결과를 바탕으로 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 예측하기 위한 관계식으로서 교각의 형상비를 주요변수로 한 상관식을 제안하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 손혁수, 심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구, 박사학위논문, 영남대학교, 2002. 8.
2. 한국도로공사, "고속도로 기존 교량의 유형별 내진성능 평가를 위한 실험적 연구", 한국도로공사 도로연구소 연구보고서, 중앙대학교, 영남대학교, 서울대학교, 2001년 10월.
3. Priestley M. J. N., Seible F., and Calvi G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley, New York, 1996.
4. Lee, Jae-Hoon., "A Study on Analysis of Unbraced Reinforced Concrete Plane Frames with Slender Columns for Design Purposes," Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, U.S.A., May, 1991.
5. Nagi A. Abo-Shadi, M. Saiid Saiidi, and David H. Sanders, "Performance-Based Design of Confinement Reinforcement Concrete Bridge Pier Walls for Out-of-Plane Seismic Loads," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 1, January-February, 2001, pp. 3-15.
6. Park, R. and Paulay T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.
7. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., "Micro and Macro Models for Bond behavior in Reinforced Concrete," *Journal of the Engineering, University of Tokyo(B)*, Vol. 39, No. 2, 1987, pp. 133~194.