



2차원 래티스 모델에 의한 반복 하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석

권민호¹⁾ · 하기주²⁾ · 박태규¹⁾ · 조창근^{3)*}

¹⁾경상대학교 토목공학과 ²⁾경일대학교 건축학부 ³⁾조선대학교 건축학부

Analysis of Reinforced Concrete Columns under Cyclic Loads Using a 2-Dimensional Lattice Model

Min-Ho Kwon,¹⁾ Gee-Joo Ha,²⁾ Tae-Gyu Park,¹⁾ and Chang-Geun Cho^{3)*}

¹⁾Dept. of Civil Eng., Engineering Research Institute, Gyeongsang Natl. University, Jinju 660-300 Korea

²⁾School of Architecture, Kyungil University, Gyeongsan 712-904 Korea

³⁾School of Architecture, Chosun University, Gwangju 501-759 Korea

ABSTRACT An efficient design concept for earthquake loads, which is called performance based design, has been standard design in USA, Europe and Japan since those countries experienced severe earthquake damage at end of 90's. For general design, strut-tie model well predicts the strength of the disturbed region, however, it does not provide ductility information at the failure. Therefore, simple tools which are able to predict both the strength and the ductility of RC structures are in demand. 2D lattice model is introduced in this study as an analysis tool for the RC structures subject to earthquake. Experimental correlation studies indicate the 2D lattice model quite well predict the strength as well as the ductility of RC structures.

Keywords : nonlinear lattice model, reinforced concrete column, cyclic loads, confining effect

1. 서 론

20세기 말부터 지구촌 전반에 걸쳐 강진의 발생이 빈번해지면서 내진 성능 설계 개념이 구체적으로 고려되었다.¹⁻³⁾ 비선형 영역에서 구조물의 성능은 실험적으로 측정 가능하지만, 실제 설계 과정에서 요구되는 구조물의 성능을 평가할 수 있는 간편하면서 신뢰성 있는 해석법이 필요하다. 구조물의 강도뿐만 아니라 변형 성능을 고려한 연성 설계 개념의 관심증대 인하여 강도와 연성의 예측이 가능하면서 반복 하중의 영향을 반영한 간편 해석법이 성능설계에서 합리적인 해석법이 될 수 있다. 더불어 구조물의 고층화, 대형화 및 장기간화에 따른 고강도 콘크리트 사용의 뚜렷한 증가로 인하여 고강도 콘크리트 구조물의 성능 평가 및 해석법에도 보다 면밀한 연구가 필요할 것이다.

이 연구의 목적은 보통강도 및 고강도 콘크리트를 적용한 철근콘크리트 부재의 반복 하중 하에서의 내력 및 연성 거동 능력을 비교적 타당성 있게 예측할 수 있는 2차원 래티스 모델(lattice model)에 의한 비선형해석기법의 개발에 있다. 이 래티스 모델은 콘크리트와 철근의

래티스 부재로 구성되며, 콘크리트의 래티스 모델은 압축 및 인장 부재로서 반복 이력 거동을 고려한 압축 및 인장 균열의 구성 모델을 적용하고 변형 에너지의 최소화 원리에 의해 스트럿의 유효폭을 산정토록 하였다. 철근 부재의 비선형 이력 특성을 고려하였으며, 또한 횡방향 철근에 의한 콘크리트의 구속 효과를 고려하기 위해 보통 콘크리트의 구속 효과와 고강도 콘크리트의 구속 효과에 대한 제안식을 별도로 적용하였다. 래티스 모델에 의한 개발 프로그램을 이용 보통강도 콘크리트 기둥 시험체, 그리고 고강도 콘크리트를 적용한 기둥 시험체를 대상으로 해석 예를 수행하여 개발된 철근콘크리트 래티스 모델의 타당성에 대해서 검토하였다.

철근콘크리트 부재 비선형 해석법에는 Takeda 모델⁴⁾에 기반을 둔 골조 요소(frame elements) 또는 층상화 단면 해석(fiber sectional analysis)⁵⁾을 이용한 방법이 있다. 그 외 Spacone 등⁶⁾은 층상화 단면에 수치적분의 정밀 유연도 유한요소 골조 비선형 모델을 개발하였다. 국내의 경우 전단변형 및 비탄성스프링에 의한 소성힌지를 고려한 일원 성분 모델,⁷⁾ 모멘트 내력의 취성적 감소를 고려한 이축 휨 부재 모델,⁸⁾ 2필드 혼합법의 층상화 유한 요소 모델,⁹⁾ 및 층상화이론에 국부좌굴, 손상 및 변동축력을 고려한 콘크리트 충전 강관 기둥의 해석 모델¹⁰⁾의 연구가 이루어졌다.

*Corresponding author E-mail: chocg@chosun.ac.kr

Received August 21, 2009, Revised October 16, 2009,

Accepted November 2, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

이 연구에서 래티스 모델의 필요성은 기존 스트럿-타이 모델이 가지는 강도 평가에서의 장점 이외에 스트럿-타이 모델에서 다룰 수 없는 연성 및 변형 능력 예측과 반복 하중에 따른 이력 현상을 고려할 수 있으면서, 더불어 간편하게 부재 비선형 모델 정식화 및 해석이 가능한 장점이 있다.

2. 래티스 모델의 개발

이 연구에서 개발된 철근콘크리트 기둥의 2차원 비선형 래티스 모델에 관한 이론 개념은 다음과 같다.

2.1 고정 트러스의 래티스 모델

철근콘크리트 기둥의 래티스 모델은 Fig. 1과 같이 콘크리트와 철근의 래티스 부재로 구성된다. 여기서, 유효 깊이 d 는 철근콘크리트 기둥의 수직철근의 중심에서 중심사이의 거리로 결정되어지며, 대각 압축 부재와 대각 인장 부재가 45° 또는 135° 의 각도로 가정된다. 이는 균열의 발생 각도가 45° 로 고정되어 래티스 모델이 균열에 대해서 고정 트러스 모델로 가정하였다. 이로 인해 골재의 맞물림과 마찰, 철근의 다우얼 작용, 직접 전단과 같이 전단에 저항하는 각 요소들을 직접적으로 고려할 수 없으나 내력의 흐름을 고려한 아치 부재가 전단저항 메커니즘을 적절하게 예측하도록 하였다. 따라서 아치 부재의 위치와 단면적의 결정이 매우 중요하며, 이는 구조물의 형태와 하중에 의해서 결정된다.

2.2 부재의 모델링

Fig. 2에서 철근콘크리트 기둥 단면의 폭 b 에 대해 래티스 모델에서의 아치 부재의 단면 폭 bt 를 의미하는 t 값의 결정은 이 래티스 모델에서 중요한 부분으로서, t 값은 부재의 단면에서 전체 폭과 아치 부재의 폭의 비인 0에서 1사이의 값이다. 이 연구에서는 모델의 효율성과 최적화를 위해 최소 변형 에너지 원리를 이용 1 mm 미만의 작은 변위에 대해 변형 에너지가 최소가 되는 값을 결정하는 다음 식으로 추정토록 하였다.

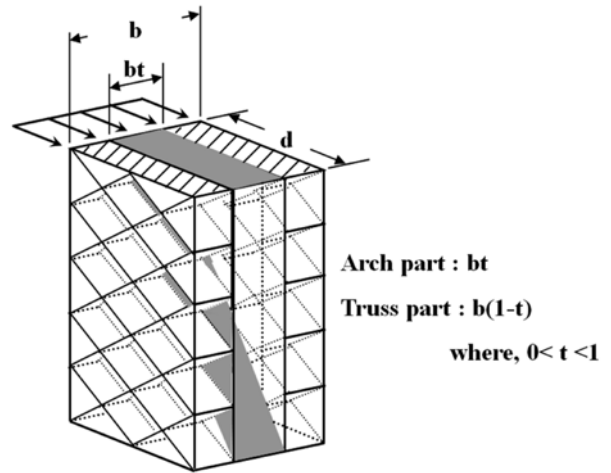


Fig. 2 Cross section of RC column modeled by the 2D lattice model

$$\sum F_i l_i \varepsilon_i = \text{Minimum} \quad (1)$$

여기서 F_i 는 부재력, l_i 는 부재의 길이, ε_i 는 부재의 변형률이다. 최소 변형 에너지 원리에 의해 구해진 t 값 산정에 의해 아치 부분의 단면폭은 bt 로 고려되고 아치 부분을 제외한 트러스 부분의 단면폭은 $b(1-t)$ 로 고려된다. 또한 아치 부재는 두 개가 배치된다.

콘크리트의 수직 부재는 실제 철근콘크리트 부재에서의 피복두께를 의미한다. 래티스 모델에서는 콘크리트 수직 부재의 단면적 결정에 있어서 철근과 콘크리트의 부착을 고려하여 피복두께의 두 배를 적용한다.

Fig. 3에서처럼 철근 수직 부재의 단면적은 하중이 가해지는 방향과 수평한 방향의 철근면적을 1:2:1의 비율로 분배하며, 2차원 모델이므로 수직한 방향의 철근은 정 위치에 위치시킨다. 3차원 모델의 경우 모서리 철근은 양면에 한부분만 고려하여 전체단면의 철근면적이 래티스 모델의 철근면적과 동일하도록 모델한다. 철근 수평 부재의 단면적은 식 (2)와 같이 표현되는 철근콘크리트 부재에 있어서의 수평철근비와 식 (3)과 같이 표현되는 래티스 모델에서의 수평철근비를 같게 함으로써 구할 수 있다.

$$\rho_w = \frac{A_w}{b_w \cdot s}, \rho_{w-lattice} = \frac{A_{w-lattice}}{b_w \cdot 0.5d} \quad (2), (3)$$

여기서 ρ_w 는 철근콘크리트 부재의 수평철근비, A_w 는 한

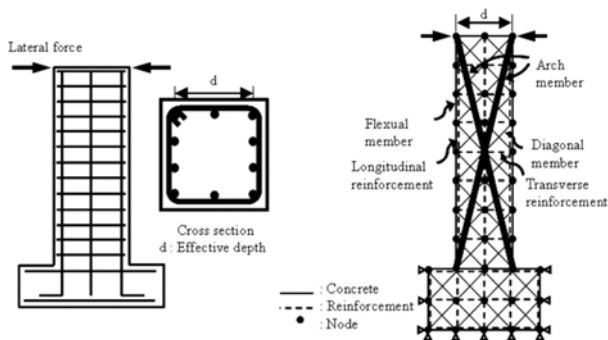


Fig. 1 Outline of the lattice model

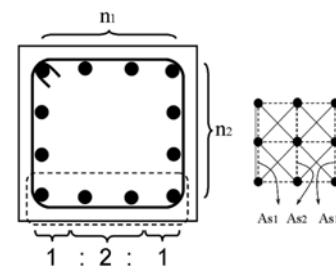


Fig. 3 Modeling of longitudinal reinforcement

쌍의 수평철근의 단면적, b_w 는 복부 단면폭, s 는 수평철근의 간격, $\rho_{w-lattice}$ 및 $A_{w-lattice}$ 는 래티스 모델의 수평철근비 및 단면적이다. 전단 저항 메커니즘을 구현하기 위하여 모델 내부에 아치 부재를 배치한다. 아치의 위치와 방향이 전단 저항에 중요한 요소이며 하중과 기하학적 조건에 따라 달라지므로 탄성 해석을 통한 응력 흐름 등을 고려하여 배치위치를 결정하였다.

이상으로부터, 이 래티스 모델에 고려된 철근콘크리트 부재의 아치, 트러스, 콘크리트의 수직, 철근의 수평 및 수직 부재를 각각에 대한 단면적은 Table 1과 같이 산정된다.

3. 콘크리트 및 철근 재료의 구성 모델

3.1 콘크리트의 구성모델

콘크리트의 응력 및 변형을 관계는 Fig. 4와 같이 Mohd Yassin¹¹⁾의 이력 거동을 고려한 모델을 적용하였다. 이는 Kent-Park¹²⁾의 단조하중 상태 및 반복하중 하에서의 Karsan & Jirsa¹³⁾의 제안식에 따르는 이력 곡선으로 구성된다.

Fig. 5는 이 모델의 단조하중에 의한 콘크리트 응력-변형도 관계로서 세 개 구간으로 해석된다. OA 구간은 식 (4)와 같이 이차식으로, AB 구간은 식 (5)와 같이 일차식, BC 구간에서는 식 (6)과 같이 상수로 표현된다.

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$f_c = f_c' [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad (5)$$

$$f_c = 0.2f_c' \quad (6)$$

여기서 f_c 는 콘크리트의 응력, f_c' 는 콘크리트 압축강도를

Table 1 Cross-sectional area of each members

Member	Section area	Note
Arch	$A_{arch} = \frac{1}{2} b t \sin \theta$	b : height of RC section θ : angle between RC section and arch member
Truss	$A_{truss} = \frac{b(1-t)d}{4} \sin 45^\circ$	
Conc. vertical	$A_{vert} = 2cb$	c : cover of RC member
Bar vertical	$A_{s1} = \left(\frac{n_1 + 2n_2}{2} - 2 \right) \cdot A_l$ $A_{s2} = n_1 \cdot A_l$	n_1, n_2 : number of vertical bars in width and height of RC section, respectively A_l : section area of single bar in vertical direction
Bar horizontal	$A_{w-lattice} = \frac{0.5d}{s} A_w$	

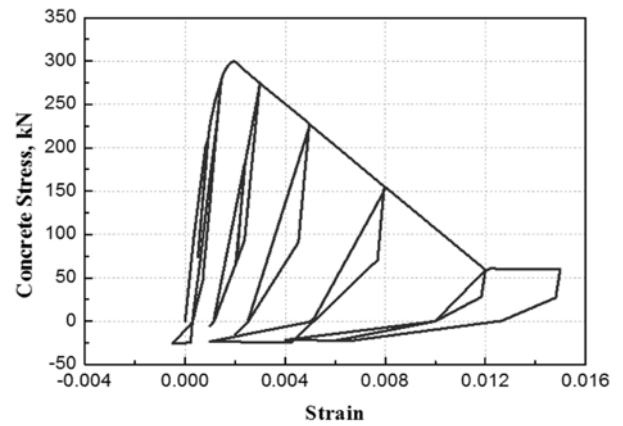


Fig. 4 Loading and unloading curve by Mohd Yassin (1971)

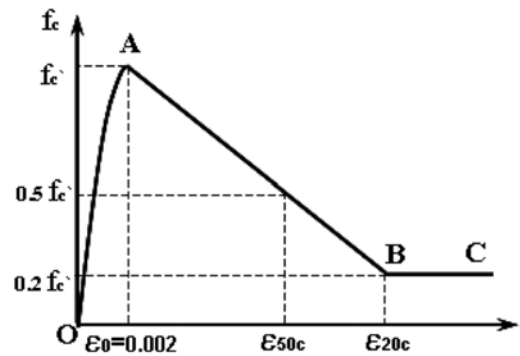


Fig. 5 Stress-strain relationship by monotonic loads

나타낸다. 또한 Z 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50c} - \varepsilon_0} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{50c} = \frac{3 + 0.002f_c'}{f_c' - 1000} + \frac{3}{4} \rho'' \sqrt{\frac{b''}{s}} \quad (8)$$

여기서 ρ'' 는 횡방향 철근비, b'' 는 콘크리트 코어 부분의 폭, 그리고 s 는 횡방향 철근의 간격이다. 콘크리트의 인장모델은 인장강도까지는 선형탄성으로 인장강도 도달 이후에는 선형적으로 인장연화 거동하는 것으로 가정하였다.

3.2 철근의 구성 모델

철근의 구성 관계는 강재 및 금속재료에 주로 적용되는 Menegotto와 Pinto¹⁴⁾의 제안식으로, Fig. 6과 같이, 이는 응력-변형도 곡선에서 초기강성 E_0 및 항복이후의 강성 E_1 을 갖는 두 개의 점근선을 이용하여 강성의 변화를 고려한 모델로서 기본식은 다음과 같다.

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^{*R})^{1/R}} \quad (9)$$

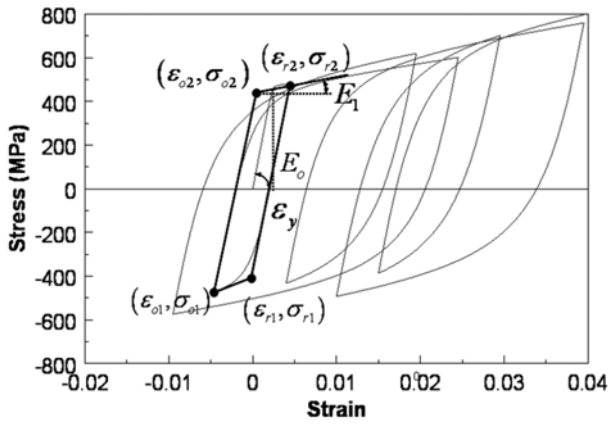


Fig. 6 Stress-strain relationship of steel bars

여기서 σ^* , ε^* , R 및 b 는 각각 다음 식과 같으며, 각 식의 변수들은 Fig. 6에 나타난 것과 같다.

$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \quad (10)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \quad (11)$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (12)$$

$$b = \frac{E_1}{E_0} \quad (13)$$

3.3 보통 콘크리트 구속 효과

콘크리트의 구속에 따른 강도 증진은 다음 식과 같다.¹⁵⁾

$$f'_{cc} = f'_c (2.254 \sqrt{1 + 7.94 f'_l / f'_c} - 2 f'_l / f'_c - 1.254) \quad (14)$$

$$f'_l = 0.75 \rho_w f_{wy} \quad (15)$$

여기서 f'_c 는 구속 전 콘크리트 압축강도, f'_l 는 횡방향 철근비 ρ_w 및 횡방향 철근의 항복강도 f_{wy} 로부터 산정된다.

3.4 고강도 콘크리트

고강도 콘크리트의 횡방향 철근에 의한 구속 효과는 다음 식과 같이 고려하였다.¹⁶⁾

$$f'_{cc} = 0.85 f'_c + 10.3 (\alpha \rho_w f_{wy})^{0.4} \quad (16)$$

여기서 b_l 는 수직철근의 간격, b_c 는 횡방향 철근의 중심간 가로 폭, d_c 는 횡방향 철근의 중심간 세로 폭, s 는 횡방향 철근 간격, α 는 다음 식과 같다.

$$\alpha = \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6 b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2 b_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2 d_c}\right) \quad (17)$$

4. 반복 하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석 예

반복 하중을 받는 철근콘크리트 기둥 시험체에 대한 2차원 비선형 래티스 모델의 해석을 통해 실험 결과와 비교검증을 수행하였다.

4.1 Saatcioglu 등의 기둥 시험체

Saatcioglu 및 Ozcebe¹⁷⁾는 콘크리트의 일축 압축강도가 30~49 MPa 규모인 350 × 350 mm 정사각형 단면을 갖는 철근콘크리트 기둥의 14개 시험체를 제작하여 반복 하중을 적용한 지진 거동 실험을 수행하였다. 대상 시험체들 중에서 Fig. 7과 같이 작용하는 고정 축력의 압축하중이 600 kN에 콘크리트의 압축강도 및 횡방향 철근의 설계변수를 달리한 세 시험체에 대하여 실험 결과와 이 연구에서 개발된 래티스 모델에 의한 해석과의 비교를 수행하였다. 실험 대상 기둥의 배근 및 실험 변수들은 Table 2와 같다. 실험에서 횡하중에 대한 반복 하중 재하하는 변위제어에 의해 최대 변위연성비에 대해 3회주기의 반복 이력 하중으로 재하 시험을 수행하였다.

시험체 U4에 대한 횡방향 하중-변위 거동에 대한 실험 및 래티스 모델에 대한 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 모델에 의한 해석 결과는 반복 하중의 주기 및 변위 증가에 따른 하중-변위의 이력 거동, 강도 저하 및 강성 저하 등에 따른 대상 실험체의 거동을 비교적 잘 묘사해 주었다. 콘크리트의 압축강도, 횡방향 철근비 등을 달리한 실험체 U6 및 U7에 대한 횡방향 하중-변위 거동에 대한 실험 및 해석 결과를 비교하여 Figs. 9 및 10

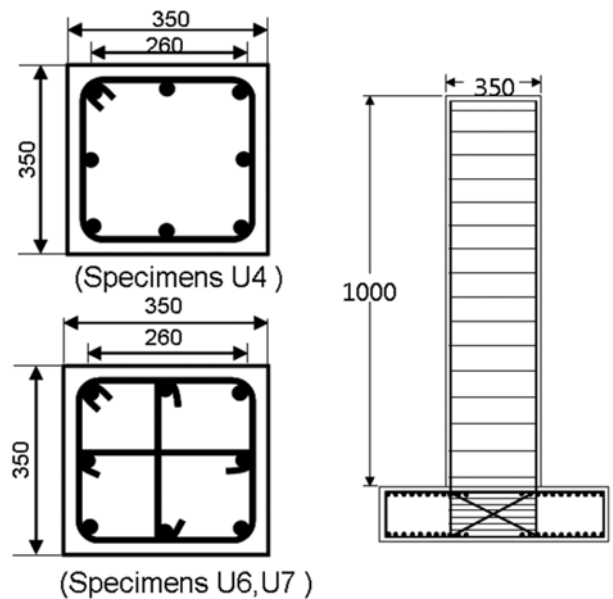


Fig. 7 Specimen details¹⁷⁾

Table 2 Test matrix¹⁷⁾

Test specimen	Lateral reinforcement (mm)		Concrete strength (MPa)	Axial load (kN)	Longitudinal reinforcement		Transverse reinforcement	
	Dia.	Spacing			ρ^*	f_y (MPa)	ρ	f_y (MPa)
U4	10	50	32.0	600	0.0327	438	0.0254	510
U6	6.4	65	37.3	600	0.0327	437	0.0195	510
U7	6.4	65	39.0	600	0.0327	437	0.0195	446

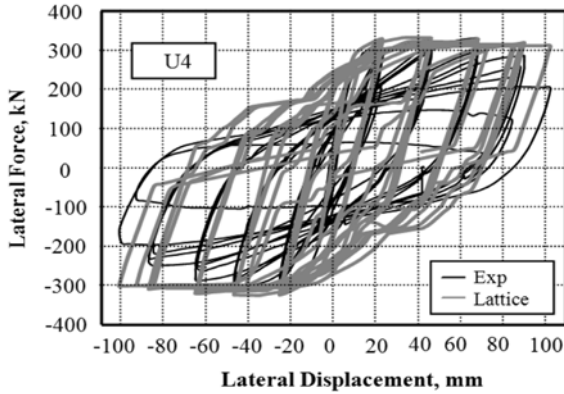


Fig. 8 Lateral force-displacement (U4)

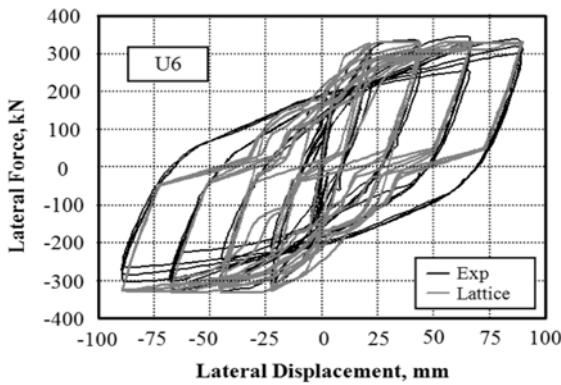


Fig. 9 Lateral force-displacement (U6)

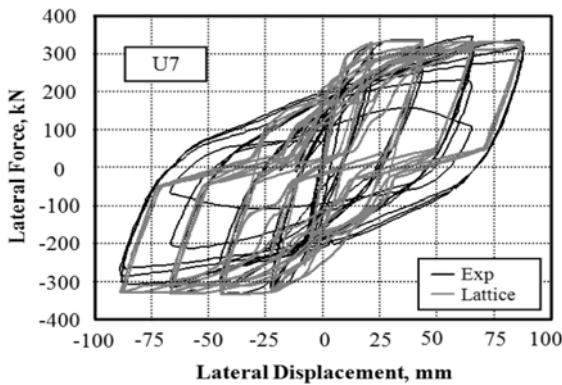


Fig. 10 Lateral force-displacement (U7)

에 나타내었다. 콘크리트의 압축강도 및 횡방향 철근비 특성의 차이에 따른 하중-변위 이력거동에 대한 실험에서의 차이는 해석 결과에서도 비슷한 양상으로 결과를 나타내었다.

부재의 인장철근이 최초로 항복할 때의 변위인 항복변위 Δ_y 에 대한 임의 하중 단계에서의 부재 변위 Δ 에 대한 비를 변위연성비 μ 로 정의할 수 있다. 시험체 U4, U6 및 U7에 대한 반복 하중에 대한 변위연성비 증가에 따른 횡하중 관계에 대한 실험 및 래티스 모델에 의한 해석 결과를 비교하여 각각 Figs. 11, 12 및 13에 나타내었다. 래티스 모델은 콘크리트의 압축강도 및 횡구속 철근의 실험 변수를 달리한 경우에 대해서도 변위연성비 증가에 따른 철근콘크리트 기둥의 횡방향 내력 특성을 잘 예측해 주었다.

Fig. 14는 시험체 U6에 대한 반복하중에 따른 변위 연성비 증가에 따른 누적 변형 에너지 소산 능력에 대해서 실험에서 예측된 값과 비교하여 나타낸 것으로 이 모델은 이력거동을 하는 동안 변위연성비 증가에 따른 누적 변형 에너지 소산 능력에 대해서도 비교적 실험값을 정확히 예측해 주었다.

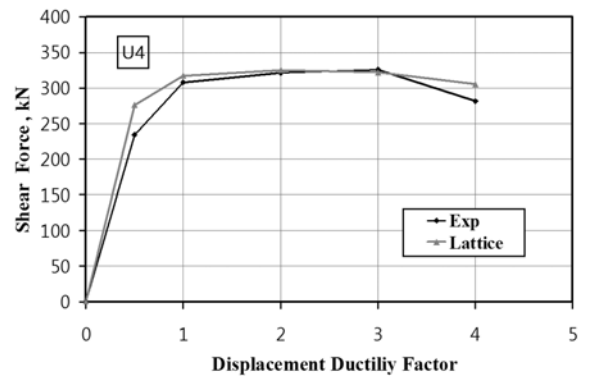


Fig. 11 Force-displacement ductility (U4)

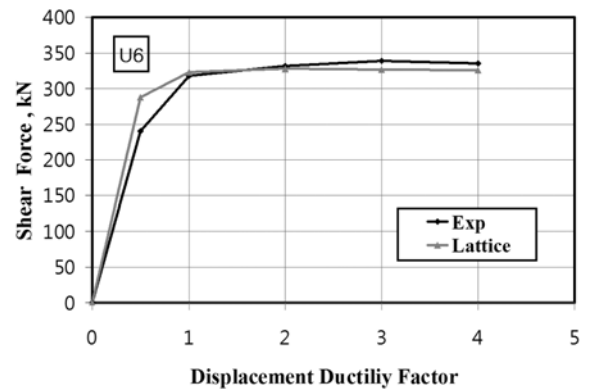


Fig. 12 Force-displacement ductility (U6)

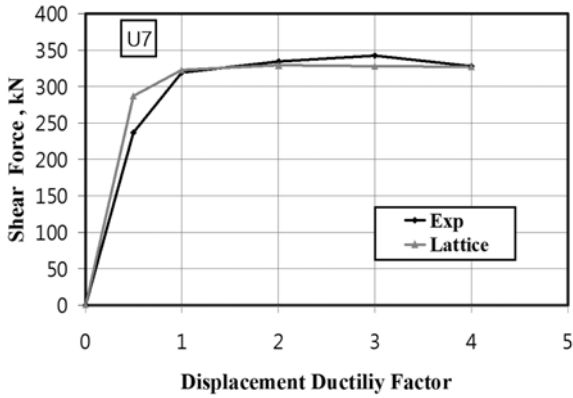


Fig. 13 Force-displacement ductility (U7)

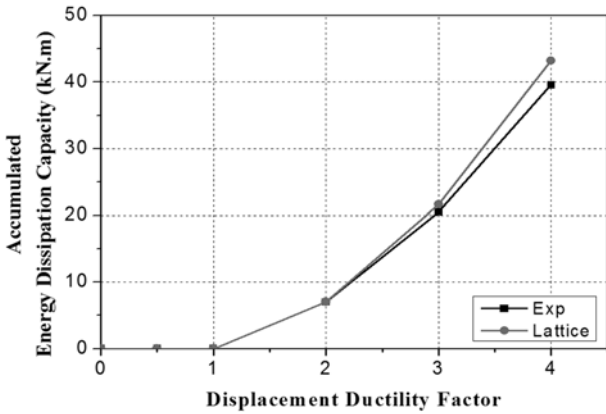


Fig. 14 Energy dissipation capacity (U6)

4.2 Xiao 등의 고강도 콘크리트 기둥 시험체

Xiao 등¹⁸⁾은 압축강도가 76~86 MPa인 고강도 콘크리트를 타설한 기둥에 대한 일정 축력하에서의 반복 횡하중을 받는 단면 254 × 254 mm 정방형 기둥에 대한 지진 성능 실험을 수행하였다. 실험 대상 기둥의 배근상세 및 실험 변수메타들은 각각 Fig. 15 및 Table 3과 같다. 시험체의 설계변수는 고정된 압축하중, 콘크리트의 압축강도, 그리고 축방향 및 횡방향 철근비이다. 높이 1,016 mm의 기둥에 작용하는 압축하중이 기둥의 압축내력의 10%인 경우의 세 실험체를 대상으로 이 연구에서 개발된 래티스 모델에 의한 해석 결과와 실험 거동을 비교토록 하였다. 실험에서 횡하중에 대한 반복 하중 재하는 변위제어에 의해 최대 변위연성비 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 및 8 마다 각각에 대해 3회주기의 반복 이력 하중으로 재하 실험을 수행하였다.

Table 3 Test parameters¹⁸⁾

Test specimen	Lateral reinforcement (mm)		Concrete strength (MPa)	Axial load (kN)	Longitudinal reinforcement		Transverse reinforcement	
	Dia.	Spacing			ρ^*	f_y (MPa)	ρ	f_y (MPa)
19T10	9.5	51	76	489	0.0352	510	0.0367	510
16T10	9.5	51	86	534	0.0248	510	0.0367	510
19T06	6.4	51	86	534	0.0248	510	0.0163	446

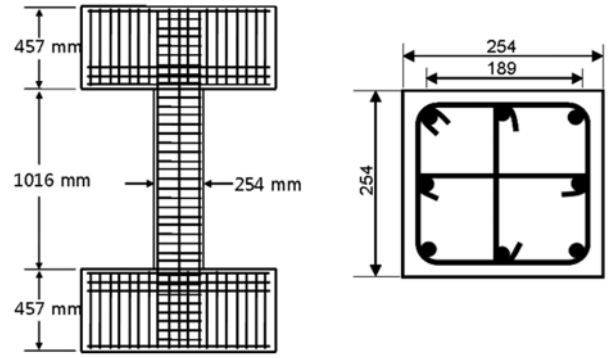


Fig. 15 Specimen details for Yan Xiao experiment

콘크리트 압축강도 76 MPa인 고강도 콘크리트를 적용한 시험체 19T10에 대한 반복 하중 재하 시험에 대한 실험 및 해석 결과, 횡방향의 하중-변위 관계를 Fig. 16에 나타내었다. 반복 하중의 횡수가 적은 경우에는 대체로 해석과 실험이 일치하는 경향을 나타내었으나, 반복 하중 횡수가 증가하면서 실험에 비해 해석에 의한 결과가 대체적으로 횡하중에 대한 내력에서 10% 가량 상회하는 결과를 보였다. 한편 콘크리트 압축강도 86 MPa에 횡방향 및 횡구속 철근량의 변수를 각각 달리한 두 시험체 16T10 및 19T06 시험체에 대한 횡방향 하중-변위 관계의 실험 및 해석 결과를 각각 Figs. 17 및 18에 나타내었는데, 두 시험체에 대한 이력 곡선의 예측 결과는 반복 하중의 횡수에 따른 변위 증가 및 횡방향 내력 증가의 실험에서의 경향을 비교적 잘 예측한 것으로 평가되었다.

고강도 콘크리트를 적용한 시험체 19T10, 16T10 및 19T06 각각에 대한 변위연성비 증가에 따른 횡방향 내력

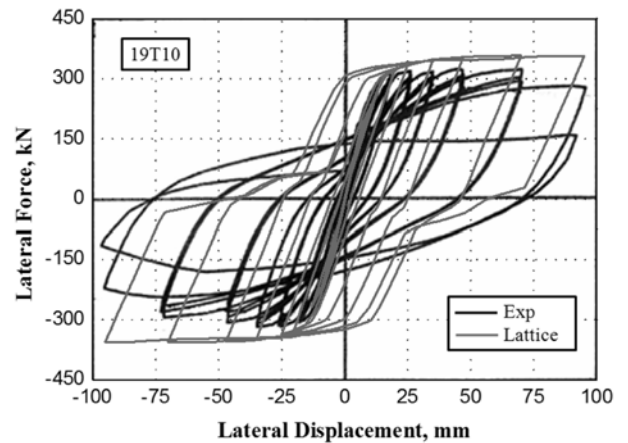


Fig. 16 Lateral force-displacement for 19T10

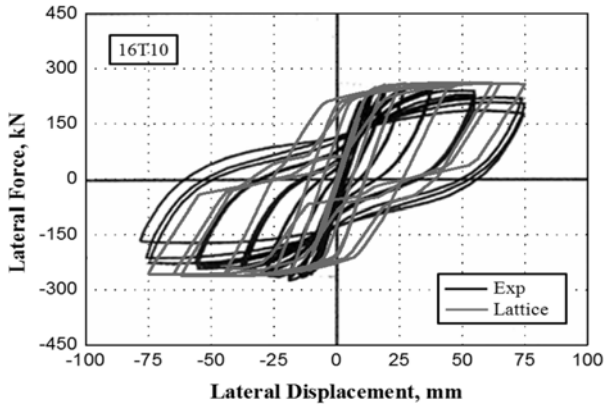


Fig. 17 Lateral force-displacement for 16T10

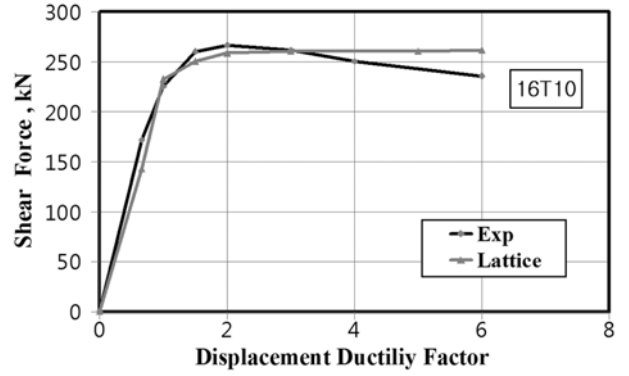


Fig. 20 Force-displacement ductility (16T10)

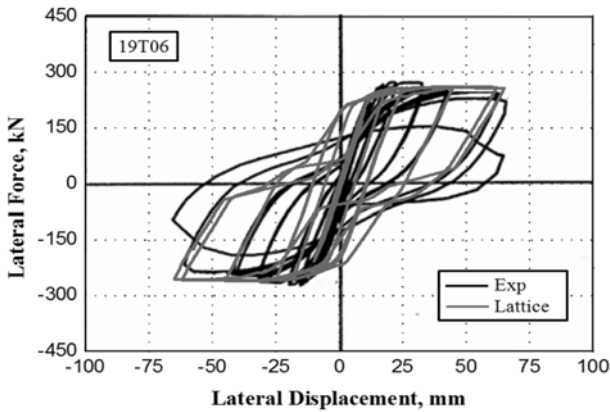


Fig. 18 Lateral force-displacement for 19T06

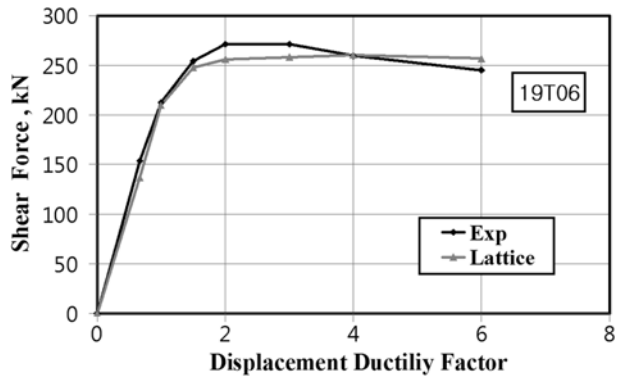


Fig. 21 Force-displacement ductility (19T06)

변화 관계에 대한 실험 및 해석 결과를 Figs. 19, 20 및 21에서 나타내었다. 인장철근의 항복까지는 전체적으로 실험 및 해석 결과가 매우 일치하는 경향을 나타내었으며, 항복 이후 시험체 19T10에서 변위연성비 증가에 따른 횡방향 내력 증가가 실험에 비해 다소 크게 예측되었으나 실험체 모두 변위연성비 증가에 따른 횡방향 내력 변화 양상을 이 래티스 모델은 비교적 잘 예측해 준 것으로 판단된다.

Fig. 22는 시험체 19T06에 대한 반복하중에 따른 변위

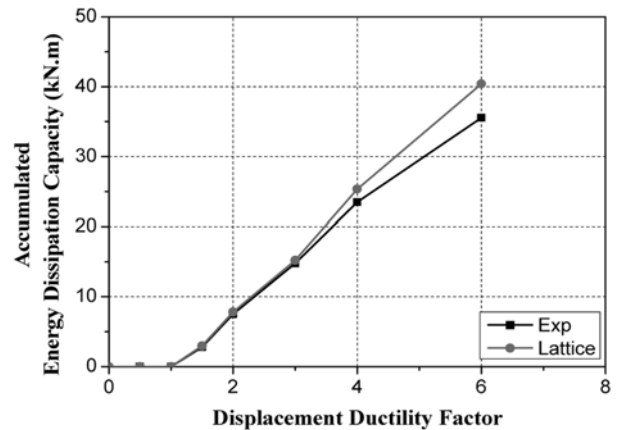


Fig. 22 Energy dissipation capacity (19T06)

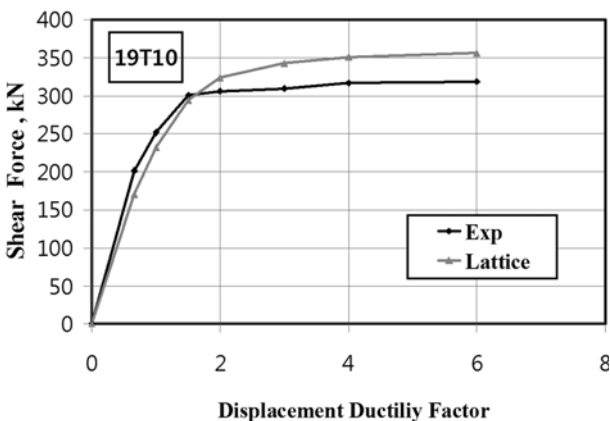


Fig. 19 Force-displacement ductility (19T10)

연성비 증가에 대한 누적 변형 에너지 소산 능력의 예측 값을 실험과 비교하여 나타내었다. 해석 결과는 이력 거동을 하는 동안 변위연성비 증가에 따른 누적 변형 에너지 소산 능력에 대해서도 비교적 실험값을 잘 예측해주었다. Figs. 14 및 22에서처럼, 반복 하중을 고려한 래티스 모델이 철근콘크리트 부재의 이력 현상을 묘사하는데도 비교적 적절한 결과를 제공해 주는 것으로 평가되었다.

이상에서 소개한 보통 및 고강도 콘크리트를 적용한 각 철근콘크리트 기둥 시험체에 대한 반복 하중을 받는 두 실험 시리즈의 6개 대상 시험체들의 횡하중의 실험 내

Table 4 Shear capacities of column specimens

Specimen	Shear capacities (kN)		
	Test result	ACI code	Lattice model
U4	326	313	327
U6	343	319	338
U7	342	319	339
19T10	328	295	349
16T10	269	257	268
19T06	273	260	270

력, 설계 전단 내력, 그리고 이 연구에서 개발한 래티스 모델에 의한 해석내력 예측값을 각각 비교하여 Table 4에 나타내었다. 실험 및 해석 결과는 ACI 규정의 설계 전단력을 상회하였으며, 실험 내력에 대한 해석 내력의 예측값은 19T10 시험체의 경우 9% 가량으로 최대 오차를 보였으나, 그 외의 시험체는 1~3% 내외의 높은 예측 결과를 보여줌으로써, 개발된 반복 하중을 고려한 래티스 모델은 철근콘크리트 기둥 부재의 강도 및 연성 거동 능력 평가에서 비교적 정확한 예측 결과를 제공해 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

철근콘크리트의 2차원 비선형 래티스 모델 개발을 목적으로 한 이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 횡방향 철근에 의한 콘크리트 구속 효과를 고려한 철근콘크리트 부재의 반복 하중-변위 관계 해석에서 비교적 정확한 거동 예측을 하였으며, 이로부터 이 래티스 모델이 반복 하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 내력 및 변위성능을 예측하는데 비교적 타당한 해석 방법으로 판단된다.
- 2) 래티스 모델에 의한 정식화를 통한 보통 콘크리트 및 고강도 콘크리트 기둥의 반복 하중에 의한 이력 곡선의 예측이 실험 결과와 비교적 잘 일치하였으며, 이는 이 연구에서 제안한 래티스 모델이 지진 하중을 받을 경우 강도저하, 강성 저하 및 변위연성도 증가에 따른 지진 에너지 흡수 능력을 예측하는데 유용한 것으로 판단된다.
- 3) 초기 강성계수는 거의 동일하게 나타나지만 항복 이후의 거동에서 철근의 국부 좌굴 효과를 고려한 철근 모델로 개선한다면 성능 설계를 위해서 간편하고 정확한 비선형 정적 푸쉬오버(pushover) 해석법으로 활용함에 있어 비교적 높은 정확도와 간편성을 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 조창근, 하기주, 배수호, “FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 4호, 2007, pp. 491~497.
2. Chopro, A. K. and Goel, R. K., “Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic Design Spectra versus Elastic Design Spectra,” *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 1, 2001, pp. 47~64.
3. Federal Emergency Management Agency (FEMA), “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” *Report FEMA 273 (Guidelines) and Report 274 (Commentary)*, Washington, DC, 1997.
4. Takeda, T., Sozner, M. A., and Nielsen, N., “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557~2573.
5. Cho, C. G. and Kwon, M., “Prediction of Nonlinear Bending Behavior for FRP Concrete Beams Based on Multi-axial Constitutive Laws,” *Engineering Structures*, Vol. 30, Issue 9, 2008, pp. 2311~2320.
6. Spacone, E., Filippou, F. C., and Taucer, F. F., “Fiber Beam-column Model for Non-linear Analysis of R/C Frame: Part Formulation,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 7, 1996, pp. 711~725.
7. 이리형, 김윤일, 천영수, “반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 이력거동에 관한 해석,” 대한건축학회 논문집, 5권, 4호, 1989, pp. 237~247.
8. 이차돈, 최기봉, 차준실, 김성진, “축하중과 이축모멘트를 받는 철근콘크리트 기둥의 모멘트-곡률에 관한 모델링 및 변수고찰,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 5호, 2002, pp. 677~688.
9. 권민호, 조창근, “철근콘크리트 보-기둥 부재의 혼합법에 의한 충상화 유한요소 해석모델,” 권민호, 조창근, 전산구조공학, 18권, 3호, 2005, pp. 7~14.
10. 정경수, 이재승, 정진안, 최성모, “변동충력과 반복 횡하중을 받는 콘크리트충전 각형강관 기둥의 이력거동에 대한 수치해석적 평가,” 대한건축학회 구조계 논문집, 24권, 6호, 2008, pp. 27~34.
11. Mohd Yassin, M. H., “Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cyclic Loads,” Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Eng., UC, Berkeley, 1994.
12. Kent, D. C. and Park, R., “Flexural Members with Confined Concrete,” *Journal of Structure Eng.*, ASCE, Vol. 97, No. ST7, 1971, pp. 1969~1990.
13. Karsan, I. D. and Jirsa, J. O., “Behavior of Concrete under Compressive Loadings,” *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST12, 1969, pp. 2543~2563.
14. Menegotto, M. and Pinto, P., “Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending,” *Proc., IABSE Symp. on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, Lisbon, 1973, pp. 15~22.
15. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete,” *J.*

- Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1827~1849, pp. 131~141.
16. Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns," *J. Struct., Div.*, ASCE, Vol. 108, No. ST12, 1982, pp. 2703~2722.
17. Saatcioglu, M. and Ozcebe, G., "Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading, American Concrete Institute," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 1, 1989, pp. 3~12.
18. Xiao, Y. and Martirosyan, A., "Seismic Performance of High-Strength Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 3, 1998, pp. 241~251.

요 약 미국, 유럽 그리고 일본에서는 90년대 말에 큰 지진을 경험하면서부터 지진에 대한 성능 설계 개념이 설계 기준에 포함되기 시작하였다. 일반적으로 스트럿-타이 모델은 D-영역에서 비교적 강도를 잘 예측하지만 파괴 때 연성 정보를 제공하지 않는다. 그러므로 RC 구조물의 강도와 연성을 예측할 수 있는 간단한 해석 도구가 필요하다. 이 연구에서 RC 구조물의 지진에 대한 거동을 해석할 수 있는 도구인 2차원 래티스 모델을 제안한다. 2차원 래티스 모델은 실험을 통한 상관관계 연구에서 RC 구조물의 강도뿐만 아니라 연성도 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 비선형 래티스 모델, 철근콘크리트 기둥, 반복 하중, 구속 효과