

에너지 소산능력에 기초한 철근콘크리트 부재의 이력모델

Energy-Based Hysteretic Models for R/C Members

엄태성* 박홍근**
Eom, Tae-Sung Park, Hong-Gun

국문요약

기존의 철근콘크리트 부재의 이력모델은 실험에 기초한 경험식을 사용하여 주기거동시 나타나는 강성저하를 나타내는데 중점을 두므로, 에너지소산능력을 정확히 예측할 수 없다. 최근 다양한 설계변수의 영향을 고려하여 주기거동 동안 소산하는 에너지를 정확히 계산할 수 있는 설계식이 개발되었다. 본 연구에서는 이러한 설계식에 기초하여 휨지배 부재에 대한 에너지기초이력모델(Energy-Based Hysteretic Model)을 개발하였다. 제안된 모델은 완전한 주기거동을 할 경우 실제거동과 동일한 에너지를 소산하도록 고안된 선형모델로, 주곡선(Primary Curve)과 주기곡선(Cyclic Curve)을 근간으로 하고 다섯 가지 제하/재하 규칙을 적용하여 핀칭 및 강성저하를 수반하는 주기거동을 나타낸다. 본 연구에서는 다양한 실험과의 비교를 통하여 제안된 이력모델의 정확성과 유효성을 검증하였다. 제안된 이력모델은 간단하면서도 수치해석의 적용에 용이하므로, 정적 및 동적 비선형 해석/설계 프로그램의 개발에 사용할 수 있다.

주요어 : 이력모델, 에너지소산능력, 주기거동, 강성저하, 핀칭, 철근콘크리트

ABSTRACT

Since existing hysteretic models for R/C members focused on presenting the degrading stiffness using empirical equations based on experiments, they cannot accurately predict the energy dissipation capacity during cyclic loading. Recently, design equations which can evaluate the energy dissipation capacity of R/C members were developed. Based on those equations, in the present study, an energy-based hysteretic model for flexure-dominated R/C members was developed. The proposed model was devised to dissipate the same energy as the actual one dissipated during a complete load cycle. The proposed model represents the hysteretic behaviors of R/C members accompanied by stiffness degradation and pinching using primary and cyclic curves and six unloading/reloading rules. The proposed model was verified by comparisons with various experimental results. The energy-based hysteretic model can be used to develop computer programs for static and dynamic analysis/design because it is simple and easily applicable to numerical analysis.

Key words : hysteretic model, energy dissipation capacity, cyclic behavior, stiffness degradation, pinching, reinforced concrete

1. 서론

최근 컴퓨터의 연산속도 및 저장매체와 해석방법의 발달로 인하여 건물의 내진성능을 평가하고 설계하는 방법으로서는 컴퓨터를 이용한 정적 또는 동적 비선형 해석/설계 방법들이 사용되고 있다.^{(1),(2)} 이러한 비선형방법을 통하여 철근콘크리트 건물의 내진성능을 평가/설계하기 위해서는 부재의 주기거동 특성을 정확히 반영할 수 있는 이력모델(hysteretic model)이 필요하다.

일반적으로 철근콘크리트 부재는 취성재료인 콘크리트와 연성재료인 철근의 복합체로 재료의 물성(철근 및 콘크리트의 강도), 단면형태(철근량, 배근형태, 횡보강), 하중조건(압축력, 전단경간비) 등에 따라 주기거동시 강도 및 강성저하, 핀칭(pinching)현상 등이 복합적으로 발생하여 매우 복잡한 거동특성을 나타낸다.(그림 1) 특히 주기거동에 의한 에너지 소산은 지진에 의한 구조물의 손상을 줄이므로, 구조물의 에너지 소산능력(energy dissipation capacity)을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다.

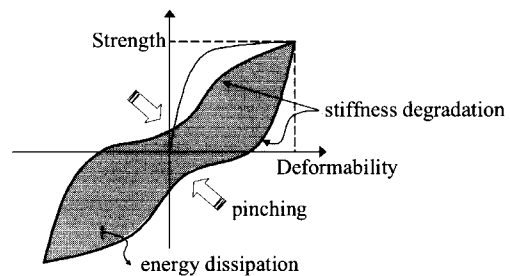


그림 1 Cyclic behavior of RC members

DRAIN-2DX와 IDARC 등 비선형 해석프로그램에서 널리 이용되는 철근콘크리트 부재의 이력모델은 이선형(bilinear)모델, Clough 모델, Takeda 모델, 비선형(nonlinear) 모델 등이 있다.⁽³⁾⁻⁽⁹⁾ 이선형모델은 수치해석에 적용이 간편하지만, 여러 실험에서 관찰되는 비탄성변형의 증가에 따른 강성저하와 핀칭을 표현하지 못하고 일반적으로 에너지 소산능력을 과대평가한다. 그림 2는 현재 가장 많이 이용되는 Clough 모델과 Takeda 모델을 개념적으로 나타내는데, 비탄성거동시 저하되는 강성에 기초하여 개발된 선형이력모델(degrading stiffness-based model)로서 강성저하를 간편하게 고려할 수 있는 장점을 지닌다. 그러나 이 모델들

* 학생회원 · 서울대학교 공과대학 건축학과 건축구조시스템 연구실, 박사과정

** 정회원 · 서울대학교 공과대학 건축학과 부교수

(대표저자 : Tel. 02-880-7055, E-mail: parkhg@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시기고 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 6. 28 / 심사종료일 : 2004. 9. 2)

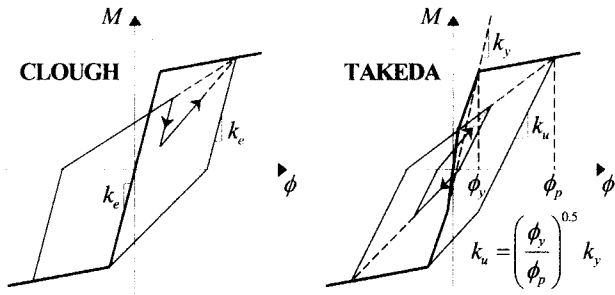


그림 2 Existing hysteretic models: Degrading stiffness-based model(saidi, 1982)

은 사용자가 부재의 이력특성을 정의하여야 하므로 실험결과에 따르거나 전문가가 아니면 정확한 이력거동을 나타낼 수 없다. 또한 재하/제하 강성은 경험식에 의존하므로 압축력을 받는 기둥과 비대칭으로 배근된 보 등의 휨지배 부재에서 흔히 나타나는 편칭현상을 정확히 나타내지 못하고, 따라서 에너지소산능력을 정확히 평가하지 못한다.^{(10),(11)} 좌표경과 김선필^{(3),(6)} 등은 기존의 선형모델과 다른 비선형 이력모델을 제시하였는데, 철근콘크리트 기둥에서 나타나는 편칭현상을 모사하기 위하여 수치해석결과의 관찰을 통하여 에너지개념을 도입하였다. 그러나 기존의 이력모델과 같이 경험적인 방법에 의존하는 한계를 가지고 있다.

언급한 바와 같이 기존의 모델들은 주기거동시 재하 및 제하 강성의 변화를 나타내고자 하는 강성기초모델(stiffness-based model)로서, 실험 및 수치해석에 대한 관찰로부터 제안된 경험적 방법에 근거하여야 하므로 단면의 특성, 즉 단면형태,

배근상세, 압축력 등의 영향을 직접적으로 반영할 수 없다. 따라서 강성저하, 편칭, 에너지 소산능력 등 다양한 철근콘크리트 부재의 주기거동특성을 정확히 나타내지 못한다.

엄태성·박홍근⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾은 단면의 형태, 배근방법, 압축력 등 설계변수의 영향을 고려하여 에너지소산능력을 계산할 수 있는 설계식을 개발하였다. 본 연구에서는 이 설계식을 이용하여 휨지배 부재의 에너지소산능력에 기초하여 주기거동특성을 나타내는 새로운 이력모델을 제안하였다. 제안된 에너지 기초 이력모델(energy-based hysteretic model)은 설계변수의 영향을 고려하여 계산되는 에너지소산능력에 기초하여 재하/제하 강성을 나타낼 수 있도록 고안되었으며, 또한 다소간 실제의 재하/제하 강성을 정확히 나타내지 못한다 할지라도 거시적으로 부재가 주기거동 동안 발휘하는 에너지소산능력을 정확히 나타내는데 중점을 두고 개발되었다.

2. 휨지배 부재의 주기거동특성 및 에너지소산능력

휨지배 철근콘크리트 부재의 주기거동 특성을 연구하기 위하여 과거 많은 실험 및 해석 연구^{(3),(12)-(21)}가 실시되었다. 이들 연구에 따르면 휨지배형 부재라 할지라도 파괴시에는 전단 및 부차 파괴 등에 의하여 급격히 강도가 저하되지만, 파괴이전에는 비교적 안정된 이력곡선을 보이고 이 안정된 이력거동에 의하여 에너지소산이 일어난다. 본 연구에서는 파괴 이전의 안정된 비탄성거동을 보이는 영역에서 주기이력곡선을 나타내는데 중점을 두었으며, 전단,

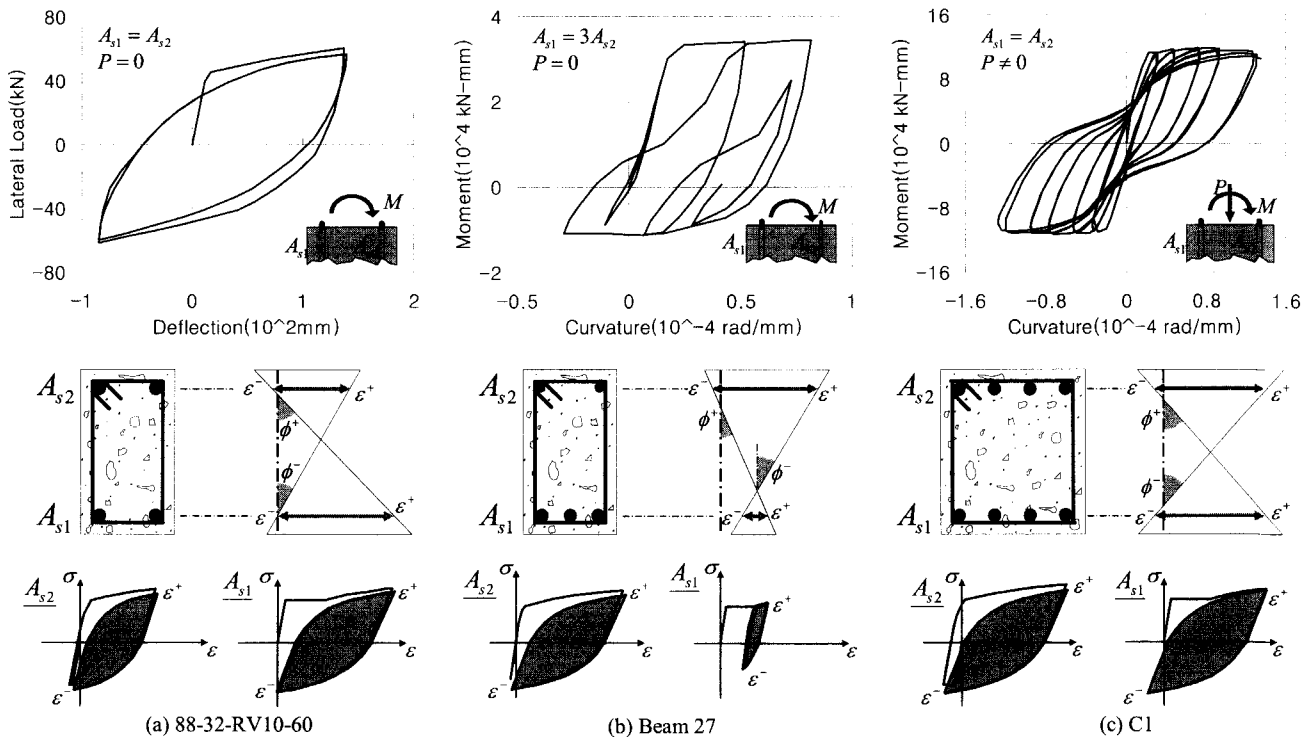


그림 3 Cyclic behavior of RC members:(a) Symmetric beam (Brown and Jirsa, 1971) (b) Asymmetric beam (Park et al., 1972) (c) Column (Abrams, 1987)

부착, 철근의 좌굴 등에 의하여 급격히 강도가 감소되며 파괴가 발생하는 변형능력(deformability)은 고려하지 않았다. Park et. al. 과 엄태성·박홍근의 연구에서 수행된 이전의 실험에 대한 관찰 및 분석 결과를 요약하면, 휨지배형 부재의 주기거동특성은 다음과 같다.

- 1) 전단파괴가 일어나기 전에는 반복적인 주기거동으로 발생하는 강도의 저하가 크지 않다. 다만, 피복콘크리트의 탈락으로 인한 강도의 저하는 나타날 수 있다.
- 2) 대칭으로 배근된 철근콘크리트 보의 주기거동은 철근의 주기이력에 의하여 지배되므로 바우싱거효과를 수반하는 철근의 이력거동과 유사한 형태의 주기곡선을 나타내고 편칭현상이 발생하지 않는다.(그림 3 (a))
- 3) 비대칭으로 배근된 보(혹은 T형보)는 비대칭 편칭현상을 나타내는데(그림 3 (b)) 작은 단면적을 갖는 철근의 조기 압축항복에 의하여 편칭이 나타난다.
- 4) 압축력을 받는 기둥은 대칭의 편칭거동을 나타내는데(그림 3 (c)) 압축력의 영향에 의하여 철근이 조기 압축항복하면서 편칭이 나타난다.

최근에 엄태성과 박홍근⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾ 등은 기존의 경험식에 의존하는 에너지 소산능력의 평가방법과는 달리 설계변수의 영향을 고려하여 휨지배 부재의 에너지 소산능력을 비교적 정확히 계산할 수 있는 방법을 개발하였다. 이 연구에 따르면, 철근콘크리트는 취성재료인 콘크리트와 소성재료인 철근으로 구성되어 있는데 반복적인 주기거동을 할 경우 취성재료인 콘크리트는 소성재료인 철근에 비하여 매우 적은 에너지를 소산하므로 철근콘크리트 부재의 에너지 소산은 주로 철근의 이력거동에 의하여 나타난다.(그림 4) 따라서 실제 각 부재는 설계변수의 영향에 따라서 편칭과 강성저하에 의하여 매우 복잡한 주기 거동특성을 나타내지만, 이에 관계없이 철근의 변형률이력을 이용하여 에너지소산능력을 정확하게 평가할 수 있다.(부록 참조) 각 부재별 에너지 소산능력의 계산방법을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 철근이 대칭으로 배근되어 있는 보(이하 대칭보)에서는 소성힌지의 단면에서 힘의 평형조건과 소성 곡률에 의하여 계산되는 철근의 변형률에 근거하여 부재의 에너지 소산능력을 계산할 수 있다.(그림 3 (a))
- 2) 철근이 비대칭으로 배근되어 있는 보(이하 비대칭보)에서는 반복적인 주기 거동시 힘의 평형조건에 의하여 주로 작은 단면적의 철근이 에너지를 소산하므로 이 철근의 변형률이력에 근거하여 부재의 에너지 소산능력을 계산할 수 있다.(그림 3 (b))

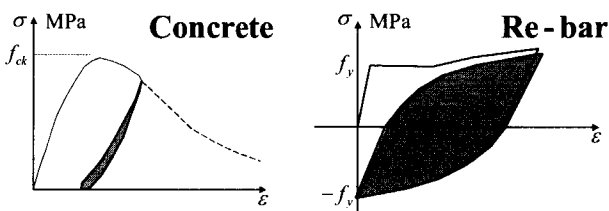


그림 4 Hysteretic behaviors of concrete and re-bars

- 3) 철근의 변형률이력의 차이는 압축력과 관계없이 곡률이력과 관계되므로, 철근의 변형률이력에 의하여 결정되는 부재의 에너지 소산능력은 압축력의 크기에 관계없이 거의 일정하다. 따라서 압축력을 받는 기둥이나 벽체의 경우, 압축력의 영향을 고려할 필요없이, 압축력을 받지 않는 가상의 휨재로 치환하여 1)항의 설명한 바와 같은 방법으로 압축재의 에너지소산능력을 계산할 수 있다. 다만, 일반적으로 웹에 철근이 배치되므로 이 영향을 고려하여야 한다.(그림 3 (c))

3. 에너지기초 이력모델

본 연구에서 제안된 에너지기초 이력모델(energy-based hysteretic model)은 강성저하와 편칭 등으로 복잡한 거동을 나타내는 철근콘크리트 부재와 동일한 에너지 소산능력을 나타내도록 고안된 선형모델이다.(그림 5) 또한 에너지 소산능력에 기초한 강성의 변화를 통하여 강성저하와 편칭 등을 보다 정확하게 나타내기 위한 모델로 개발되었다. 즉, 강성저하를 정의하는 기존의 모델과 달리 제안된 이력모델은 주기곡선에 의한 면적(에너지소산능력)을 먼저 구하고 이 면적에 근거하여 재하/제하 강성과 편칭을 나타낸다. 따라서 최대 및 최소 변형률 내에서 재하/제하가 반복되는 이력거동 경로는 실제와 다를 수 있으나, 최대 및 최소 변형률에 대하여 완전한 주기거동이 발생한다면 실제와 동일한 에너지 소산능력을 나타낼 수 있다. 제안된 모델은 기본적으로 탄성강성 및 저하된 강성을 갖는 3개의 직선으로 재하-제하 이력곡선을 나타내고(대칭보), 만약 편칭이 발생하는 경우(기둥 혹은 비대칭보)에는 최대 5 개로 확장된 직선으로 주기거동을 나타낸다.

3.1 대칭보

대칭보의 이력모델은 단조하중에 대한 모멘트-곡률 관계의 주곡선(primary curve)과 재하/제하 거동을 나타내기 위한 주기곡선(cyclic curve)으로 구성된다.(그림 6) 주곡선은 콘크리트의 횡보강효과, 피복콘크리트의 탈락 등이 고려될 수 있다. 주기곡선은 정·부 방향 최대변형률이를 이용하여 실제주기거동과 동일한 에너지소산능력 e_D 를 갖도록 대칭의 볼록 6각형 형태로 나타낸다. 그림 6 에 나타난 주기곡선을 정의하는 방법은 다음과 같다.

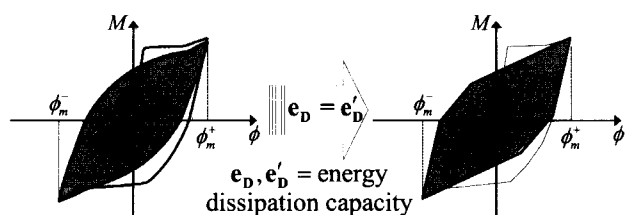


그림 5 Concept of energy-based hysteretic model

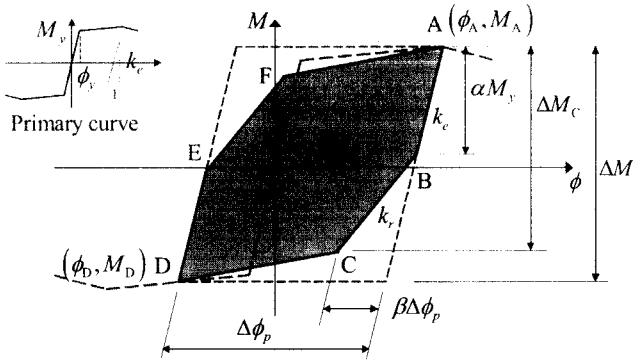


그림 6 Cyclic curve for symmetric beams based on energy dissipation capacity
우선 부록에 제시된 방법을 이용하여 단면의 최대변형

(그림 5의 ϕ_m^+, ϕ_m^-)에 대하여 완전한 주기거동에 의한 에너지 소산량 e_D 를 구한다. 부정(정)방향의 최대변형이력이 항복변형보다 작아 탄성상태인 경우에는 해당 방향의 항복 변형을 부정(정)방향의 최대변형이력으로 가정한다.(그림 7 (b)) 다음으로 에너지소산량 e_D 와 강성저하를 나타내기 위하여 도입한 계수 α, β 를 이용하여 B, C 의 위치를 결정한다. α, β 는 철근의 바우싱거효과(Bauschinger effect)에 의하여 결정되는 계수로, 본 연구에서는 실험결과에 근거하여 각각 1.0, 0.25 로 가정하였다.

그림 6 에서 A, D 점의 값은 이미 알려져 있으므로 $\Delta\phi_p$ (>0)와 ΔM (>0)은 주어진 값이고, 그로부터 ΔM_C 는 다음과 같이 구할 수 있다.

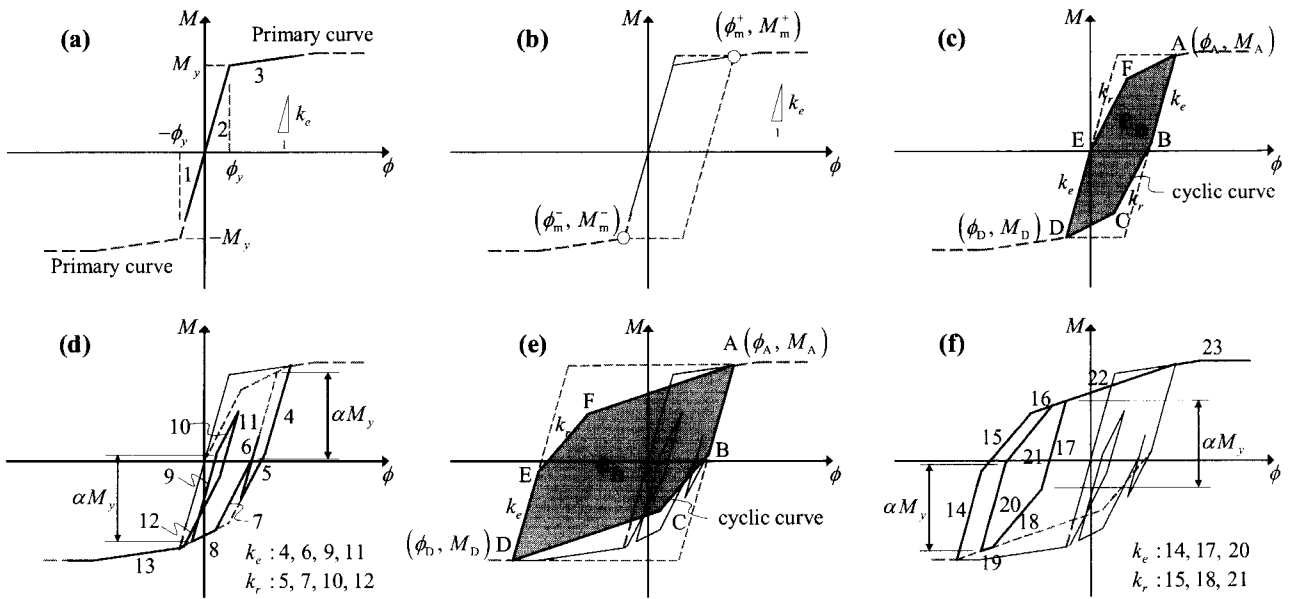


그림 7 Energy-based hysteretic model for beams with symmetric re-bar arrangement

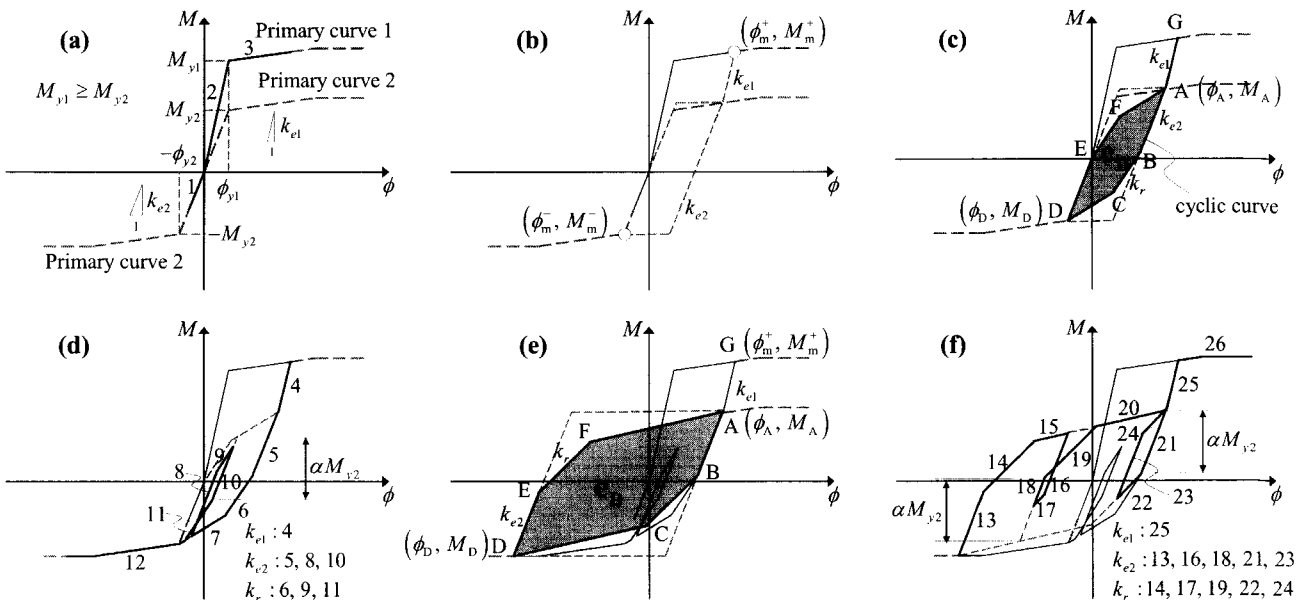


그림 8 Energy-based hysteretic model for beams with asymmetric re-bar arrangement

$$k_e = \frac{M_y}{\phi_y}, \Delta M = M_A - M_D, \Delta \phi_p = \phi_A - \phi_D - \frac{\Delta M}{k_e} \quad (1)$$

$$\Delta M_C = \frac{e_D}{\Delta \phi_p} + \beta(\Delta M - \alpha M_y) \quad (2)$$

여기서, ϕ_y, M_y = 항복곡률 및 모멘트, ϕ_A, M_A, ϕ_D, M_D = 그림 6 에 나타난 A, D 점의 곡률과 휨모멘트강도, k_e = 항복점과 원점을 잇는 탄성강성을 나타낸다. 이로부터 점 B, C 의 좌표는 다음과 같이 구한다.

$$B\left(\phi_A - \frac{\alpha M_y}{k_e}, M_A - \alpha M_y\right) \quad (3)$$

$$C\left(\phi_A - \frac{\Delta M_C}{k_e} - \beta \Delta \phi_p, M_A - \Delta M_C\right) \quad (4)$$

B, C 좌표로부터 저하된 강성 k_r 은 에너지소산량 e_D 와 소성변형량 $\Delta \phi_p$ 의 함수로, 다음과 같이 구한다.

$$k_r = \frac{\Delta M_C - \alpha M_y}{\beta \Delta \phi_p + (\Delta M_C - \alpha M_y)/k_e} \quad (5)$$

부록에 제시된 에너지소산량 산정식은 비탄성 변형이 작게 발생하는 경우 에너지소산능력을 저평가할 수 있다. 따라서 다음과 같은 구속조건을 두어 에너지소산량이 지나치게 작게 계산되지 않도록 하였다.

$$e_D \geq \alpha M_y \Delta \phi_p \quad (6)$$

E, F 는 B, C 와 대칭이므로, 동일한 방법을 사용하여 그 위치를 구한다.

그림 7은 철근이 대칭으로 배치된 보 단면에 대하여 제안된 에너지기초이력모델에 의하여 예측된 이력거동의 전형을 보여준다. 그림에서 $\phi_m^+, \phi_m^-, M_m^+, M_m^-$ 는 정·부 방향의 최대 곡률이력과 그때의 휨모멘트이다. 그림에 나타난 경로 1-23 은 선형화된 이력거동을 나타낸다. 주곡선과 주기곡선을 기준으로 한 대칭보의 이력모델의 규칙은 다음과 같다.

- 1) 정(+)-부(-) 방향의 최대 변형이력이 항복변형을 초과하지 않는 경우 탄성상태에서 제하-재하 거동이 일어난다. (경로 1, 2)
- 2) 정·부 방향의 최대변형이력을 초과하여 발생하는 최초의 비탄성거동은 주곡선을 따라 일어난다.(경로 3, 13, 23)
- 3) 주기곡선으로 이루어진 폐영역(closed loop) 내에서 초기에는 탄성강성 k_e 을 따라 제하-제하가 일어난다. (경로 4, 6, 9, 11, 14, 17, 20) 그러나, 증가 또는 감소하는 휨모멘트가 주기곡선으로부터 αM_y 이상 벗어난 경우 저감된 강성 k_r 을 따라 제하-제하가 일어난다.(5, 7, 10, 12, 15, 18, 21)
- 4) 최대변형이력보다 작은 변형에서의 거동경로는 주기

곡선으로 이루어진 폐영역을 벗어날 수 없다. 따라서 거동경로가 주기곡선과 교차할 경우 주기곡선을 따라 제하-제하가 일어난다.(8, 19, 22)

3.2 비대칭보

그림 8은 철근이 비대칭으로 배치된 보 단면에 대하여 제안된 에너지기초이력모델을 보여준다. 그림에서 주곡선 1과 2는 각각 단면적이 큰 철근과 작은 철근이 인장을 받는 경우에 대한 모멘트-곡률 관계이고, $M_{y1}, \phi_{y1}, M_{y2}, \phi_{y2}$ 는 각각 주곡선 1, 2에 관계된 항복모멘트 및 곡률을 나타낸다. 또한, k_{e1}, k_{e2} 는 각각 주곡선 1, 2의 탄성강성이다.

2장에서 설명한 바와 같이, 주기거동시 편칭을 나타내는 비대칭보가 소산하는 에너지량은 단면적이 적은 철근에 의하여 결정된다.(그림 3 (b))⁽¹²⁾ 따라서 에너지소산능력을 결정하는 주기곡선은 정·부 방향 모두 주곡선 2 를 기준으로 구성한다.(그림 8의 육각형 ABCDEF) 주기곡선을 구성하는 방법은 대칭보의 그것과 동일하다. 다만, AB 혹은 DE 구간에서 주곡선 2의 탄성강성 k_{e2} 를 사용하고 제하되는 모멘트량도 αM_{y2} 이다. 주기곡선 내에서의 이력거동은 대칭보에 대하여 제안한 4개의 규칙을 그대로 적용하고, 예외적으로 다음 항목을 추가하여 비대칭보의 편칭현상을 고려한다.

- 5) 비대칭으로 배근된 철근콘크리트 보의 경우 주곡선 1의 G와 A 사이에서는 주곡선 1의 탄성강성 k_{e1} 을 따라 제하/재하가 일어난다.(그림 8의 경로 4, 25)

3.3 기 등

2장에서 설명한 바와 같이, 압축력을 받는 철근콘크리트 부재는 휨모멘트강도가 증가하지만 주기거동에 의한 에너지소산량은 압축력에 관계없이 일정하다. 에너지소산능력의 관점에서 보면 편칭은 주기곡선에 의하여 둘러싸인 면적을 줄임으로서 강도증가에 관계없이 에너지소산량을 일정하게 유지하는 작용을 한다. 즉, 압축력의 증가에 따른 휨모멘트의 변화가 편칭에 영향을 미친다. 따라서 편칭에 영향을 주는 주요요인으로 다음의 변수를 채택하였다.

$$m = \frac{M_y}{M_{y0}} \quad (7)$$

여기서, M_{y0} = 압축력이 없는 경우 단면의 항복휨강도, M_y = 압축력이 작용하는 단면의 항복휨강도이다.

본 연구에서는 주기거동시 발생한 인장균열이 닫히면서 급격히 강성이 증가하는 점을 정의하기 위하여 다양한 휨 지배 기동부재에 대한 실험결과들^{(10),(11),(15),(16),(18),(20),(21)}로부터 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\Delta M_p = \lambda M_{y0} \quad \text{and} \quad \lambda = 1.05m + 0.445 \quad (8)$$

여기서, ΔM_p = 최대변형의 휨강도와 재하강성이 급격히 증가하는 점에서 휨강도의 차이이다. (그림 9)

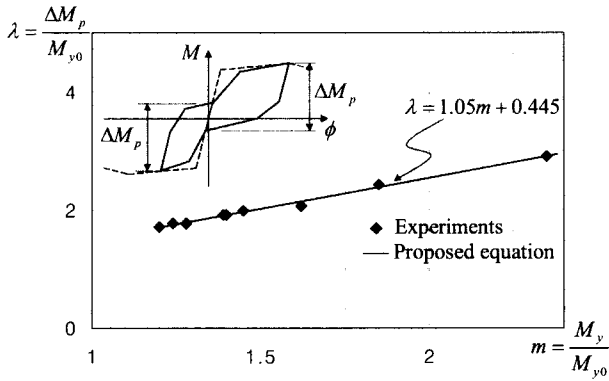


그림 9 Pinching parameter λ

그림 10은 철근이 대칭으로 배치된 기둥 단면에 대하여 에너지소산능력과 핀칭변수 λ 를 적용하여 주기곡선을 정의하는 방법을 보여준다. 핀칭을 표현할 수 있도록 원점을 통과하는 탄성강성을 기준으로 정·부 방향으로 분리하고, 각 부분에 대하여 실제 주기거동과 동일한 에너지를 소산하도록 비대칭 볼록다각형 형태의 주기곡선(cyclic curve)을 구성하는데, 그 과정은 다음과 같다.

정·부 방향의 최대극한이력 ϕ_m^+ , ϕ_m^- 에 대하여 전체 에너지소산량 e_D 를 구한다. 만약 부(정)방향의 최대변형이력이 항복변형보다 작아 탄성상태인 경우에는 항복변형을 부(정)방향의 최대변형이력으로 가정한다.(그림 11 (b)) 전체 에너지소산량 e_D 를 소성변형량의 크기에 따라 정·부 방향의 에너지소산량 e_D^+ 와 e_D^- 로 분리한다.

$$e_D^+ = e_D \frac{\Delta\phi_p^+}{\Delta\phi_p}, e_D^- = e_D \frac{\Delta\phi_p^-}{\Delta\phi_p} \quad (9)$$

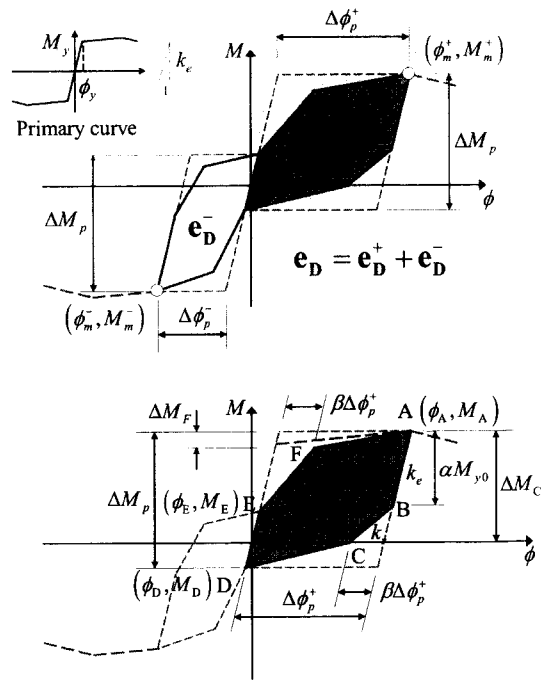


그림 10 Cyclic curve for columns

여기서, $\Delta\phi_p^+$, $\Delta\phi_p^-$ = 정·부 방향의 소성변형량, $\Delta\phi_p = \Delta\phi_p^+ + \Delta\phi_p^-$ 로 전체 소성변형량을 나타낸다.

정방향 볼록다각형에서 A, D, E는 주곡선과 핀칭변수 λ 로부터 미리 결정되는 점이다. 사각형 ABCD와 ADEF의 면적이 각각 $e_D^+/2$ 가 되도록 나머지 점 B, C, F를 결정한다. A, D 점을 이용하여 그림 10에 나타나 있는 B, C를 결정하는 방법은 대칭보와 동일하므로, 식 (1)-(4)를 이용하여 구한다. 구간 BC에서 발생하는 강성변화는, A에서 인장항복하였던 철근의 강성이 재하거동 동안 바우싱거효과로 인하여 조기에 감소하여 발생한다. Brown과 Jirsa⁽¹⁷⁾의 연구에 따르면 구간 AB에서 재하거동으로 감소되는 휨

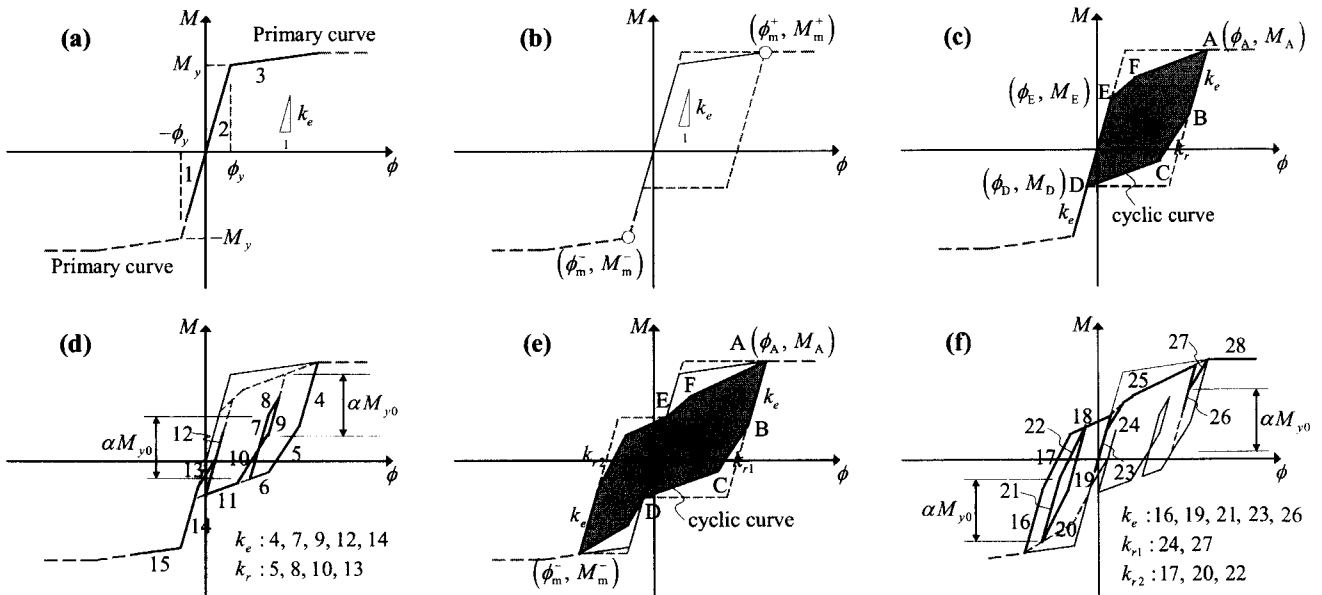


그림 11 Energy-based hysteretic model for columns

모멘트의 크기는 철근의 손실된 인장력에 비례하는 값으로 대략 M_{y0} 이고, 본 연구에서는 이를 αM_{y0} 로 나타내었다. 또한, E의 휨강도 M_E 는 기결정된 값이고, 이로부터 ΔM_F (>0)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta M_F = \Delta M_p - \beta(M_A - M_E) - \frac{e_D^+}{\Delta \phi_p^+} \quad (10)$$

따라서 F점의 좌표는 다음과 같다.

$$F\left(\beta \Delta \phi_p^+ + \frac{M_A - \Delta M_F}{k_c}, M_A - \Delta M_F\right) \quad (11)$$

구간 BC의 저하된 강성 k_c 은 식(5)와 동일한 방식으로 계산한다.

부록에 제시된 에너지소산량 산정식은 소성변형이 적은 경우 에너지소산능력을 저평가할 수 있으므로, 다음의 구속조건을 두어 주기곡선이 항상 불록다각형을 유지하도록 하였다.

$$e_D^+ \geq (M_E - M_A + \Delta M_p) \Delta \phi_p^+ \quad (12)$$

블록 6각형 모양의 주기곡선 내에서의 이력거동규칙은 대칭보에 제시된 4개의 규칙을 그대로 적용한다. 부 방향에 대해서도 앞서 제시한 정방향에 대한 방법과 동일하게 주기곡선을 구성하고, 대칭보에 대하여 제시한 이력거동규칙을 그대로 적용한다.

그림 11은 전형적인 기둥부재에 대하여 에너지기초이력 모델을 적용한 예를 보여준다.

4. 에너지기초이력모델의 검증

휨지배 철근콘크리트 부재에 대하여 제안된 에너지기초 이력모델의 검증을 위하여 실험결과와 비교하였다.

대칭보(SB)^{(11),(19)}, 비대칭보(Beam27)^{(10),(11)}, 기둥(A2, C1, C8)^{(10),(11),(16)} 세 형태의 단면에 대하여 각각 에너지기초이

력모델을 적용하였다. 각 시험체의 단면 및 재료의 성질은 그림 12와 표 1에 나타나 있다. 주곡선을 위한 단면해석시 철근의 변형률강화(strain hardening), 피복콘크리트의 탈락 등은 고려하지 않았다. 강성저하를 나타내는 변수 α , β 는 각각 1.0, 0.25를 사용하였다.

그림 12(a)-(e)는 제안된 이력모델과 실험에 의한 모멘트-곡률 주기곡선을 비교하고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 단면의 형태, 하중조건 등에 관계없이 제안된 방법과 실험결과가 비교적 잘 일치하는 모습을 보여준다. 비대칭보(그림 12의 (b))의 경우 주곡선 2에서 주곡선 1로 전이되는 편칭구간에서 제안된 이력모델이 Park et. al.⁽¹⁰⁾의 수치해석결과와 대체로 비슷한 거동을 보이는 반면 실험 결과와의 오차는 다소 크게 나타난다. 이는 수치해석시 콘크리트의 균열이 닫히는 구간이 명확하게 나타나면서 강성이 급격히 증가하는 반면, 실제 실험체의 경우 균열면에서 압축력의 전달이 보다 조기에 일어날 수 있기 때문이다.^{(10),(11)} 그림 12의 (e)는 변형에 따라 압축력이 45 kN-575 kN으로 변하는 단면에서의 주기이력모델을 보여준다. 압축력에 따라 단면의 휨모멘트 강도가 달라지므로, 이 실험체는 철근이 대칭으로 배치되어 있음에도 불구하고 비대칭의 주기거동을 보였다. 그림 12(e)에 나타난 바와 같이 제안된 이력모델은 압축력의 변화에 따른 비대칭 주기거동에 대해서도 이력거동을 비교적 정확히 예측할 수 있다.

그림 13은 휨지배 철근콘크리트 부재의 하중-변위 관계를 비교하고 있다. 그림에 휨지배 철근콘크리트 부재의 하중조건 및 변형상태가 나타나 있는데, 켄틸레버 부재의 변형은 주로 소성힌지의 변형에 의하여 결정된다. 따라서 탄성의 보-기둥(beam-column)에 소성힌지 형성부위에 소성변형을 나타낼 수 있는 회전스프링(rotational spring)을 설치한 요소로 철근콘크리트 부재를 모델링하였다.^{(22),(23)} 소성힌지의 회전스프링에 대하여 제안된 에너지기초 이력모델을 적용한다. 하중점의 총 변형량은 보-기둥에서 발생하는 탄성 변형과 회전스프링에서 발생하는 소성변형의 합으로 결정

표 1 Material properties and dimensions of specimens

Specimens	Researchers	Material Properties		Dimensions						
		f_{ck} MPa	f_y MPa	b mm	h mm	h_s mm	c_1 mm	c_2 mm	A_{s1} mm ²	A_{s2} mm ²
SB ¹⁹⁾	Park & Thomsen	24.0	287	229	457	333	62	62	1800	1800
Beam27 ¹⁰⁾	Park & Kent & Sampson	51.6	331	125	203	135	32	36	238	740
A2 ¹⁰⁾	Aoyama	33.8	345	152	305	203	51	51	568	568
C1 ¹⁶⁾	Abrams	42.3	558	230	305	217	44	44	568	568
C8 ¹⁶⁾	Abrams	42.3	592	230	305	217	44	44	568	568
88-32-RV10-60 ¹⁷⁾	Brown & Jirsa	34.0	317	152	305	203	51	51	1019	1019
OIN ¹⁵⁾	Han & Lee	24.0	397	220	220	180	20	20	258	258

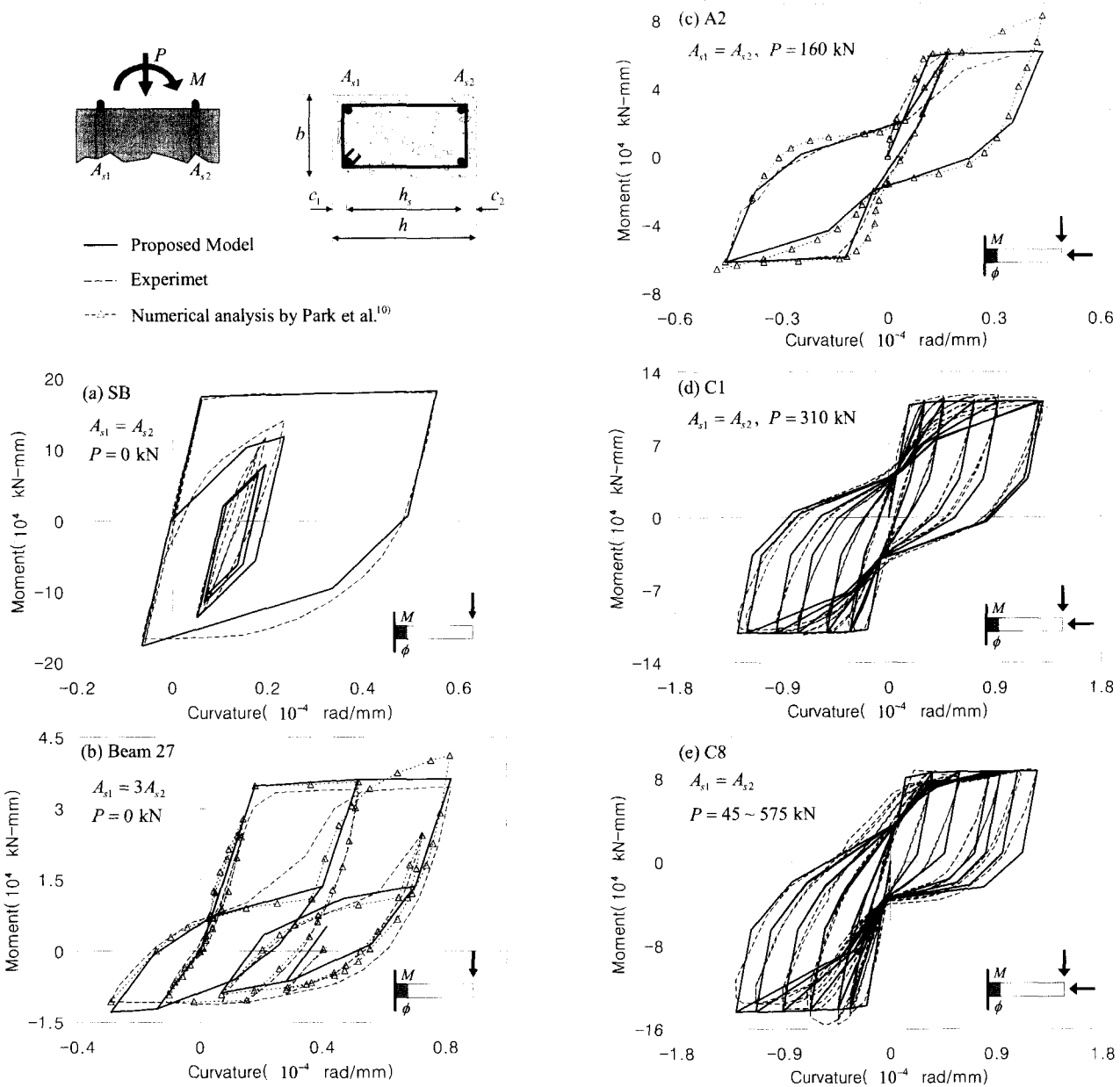


그림 12 Moment-curvature curves predicted by the proposed model: (a) Symmetric beam^{(11),(19)}, (b) Asymmetric beam^{(10),(11)} and (c), (d), (e) Columns^{(10),(11),(16)}

된다.

그림 13에 나타난 켈틸레버 부재에서 소성힌지영역의 최대곡률 ϕ_m 은 하중점에서 최대변형량 Δ_m 으로부터 다음 관계식을 사용하여 구하였다.^{(12),(13)}

$$\phi_m = \frac{\Delta_m - \frac{1}{3}\phi_y(l - l_p)^2}{l_p\left(l - \frac{1}{2}l_p\right)} \quad (13)$$

여기서, l = 부재 길이, l_p = 소성힌지 길이로 $0.5h$ ^{(2),(24)}를 사용하였는데 h 는 단면의 폭을 나타낸다. 또한, ϕ_y = 부재의 항복곡률로 단면해석을 통하여 구하거나 혹은 간편하게 참고문헌 25에 제시된 식을 이용할 수 있다.

식 (13)으로부터 정·부 방향에 대하여 구한 최대곡률 ϕ_m^+ 과 ϕ_m^- 를 이용하여 소성힌지영역 단면에서의 에너지 소산량 e_D 를 구하고, 이로부터 소성힌지에 대한 에너지기초 이력곡선을 구성하였다.

그림 13 (a)와 (b)는 각각 대칭의 보와 기둥에 대한 하중-변위 관계의 주기곡선을 보여준다. 단면 및 재료의 물성치는 표 1에 나타나 있다. 수치해석시 강성저하를 나타내는 변수 α 와 β 는 각각 1.0과 0.25를 사용하였고, 소성힌지에서의 주철근의 정착미끄러짐(bond slip), 전단변형 등은 고려하지 않았다. 그림 13에 나타난 바와 같이 제안된 이력모델과 실험결과가 비교적 잘 일치하였다. 특히 압축력을 받는 기둥인 (b)의 경우 제안된 모델이 에너지소산능력을 정확히 예측하면서 펀칭과 강성저하 등 주기거동특성을

근사적으로 나타낼 수 있음을 보여준다.

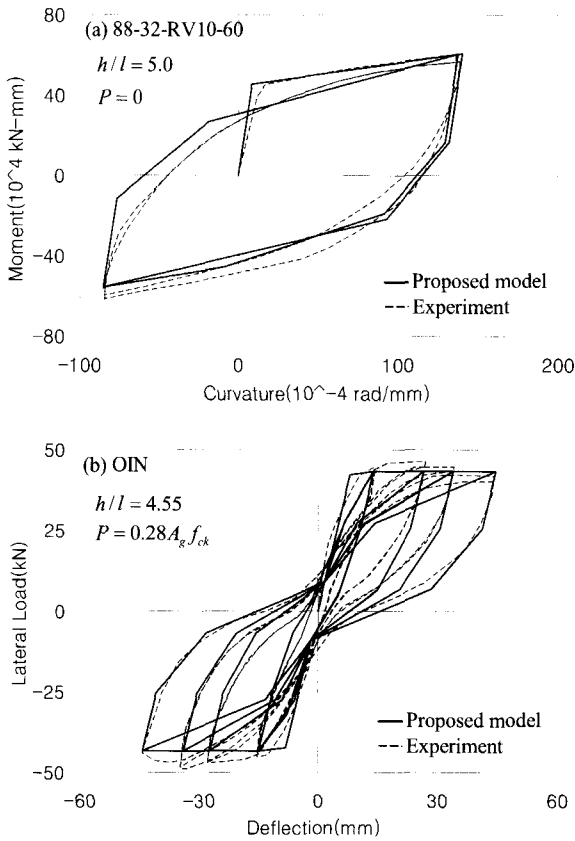
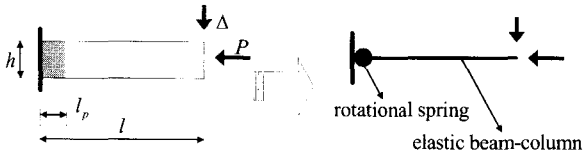


그림 13 Load-deflection curves predicted by the proposed method: (a) Symmetric beam⁽¹⁷⁾ and (b) Column⁽¹⁵⁾

5. 결 론

본 연구에서는 에너지소산성능에 기초하여 휨지배 철근 콘크리트 부재의 주기이력모델을 개발하였다. 개발된 에너지초이력모델은 압축력, 철근비, 배근형태, 연성도 등의 설계변수를 고려하여 에너지소산능력을 정확히 계산하고 이 에너지소산능력을 기초로 하여 강성저하 및 편칭현상을 나타내도록 고안되었다. 제안된 이력모델은 단조하중에 대한 단면해석을 통하여 구한 주곡선(primary curve)과 완전한 주기거동시 실제 주기거동과 동일한 에너지소산능력을 갖도록 제안된 주기곡선(cyclic curve)을 근거로 하고 여기에 5가지 재하/제하 이력규칙을 적용하여 대칭 및 비대칭 보와 기둥 등 휨지배 철근콘크리트 부재의 주기거동을 나타낸다. 제안된 이력모델과 실험결과를 비교하여 그 유효성을 입증하였다.

본 연구에서 제안된 이력모델은 설계변수로부터 이력모델을 구성하므로 간단하면서도 수치해석의 적용이 용이하며, 따라서 기존 정적 및 동적 비선형 해석 및 설계를 위한 프로그램의 개발에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 강도저하에 영향을 주는 변형능력에 대한 연구와 전단지배 부재의 이력거동에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지진공학센터(KEERC)와 건설교통부가 출연하고 건설기술평가원이 위탁시행한 건설핵심기술개발사업(초고층 연구과제:03산학연 B02-05, 사회기반시설물 중점평가연구단: 04핵심기술C02-02)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ATC, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. Building Seismic Safety Council, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA-273, Federal Emergency Management Council, Washington, D.C, 1997.
3. 곽효정, 김선필, "반복하중을 받는 RC기둥의 비선형 해석을 위한 모멘트-곡률 관계의 개발", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol. 21, No. 6-A, 2001, pp. 957-966.
4. Clough, R. W. and Johnston, S. B., "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements," *Proceedings, Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, Japan, 1966. 10, pp. 195-198.
5. Kunnath, S. K., Reinhorn, A. M., and Park, Y. J., "Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 4, 1990, pp. 996-1017.
6. Kwak, H. and Kim, S., "Nonlinear analysis of RC Beams Subject to Cyclic Loading," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 12, 2001, pp. 1436-1444.
7. Roufaiel, M. S. L. and Meyer, C., "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, 1987, pp. 429-444.
8. Saiidi, M., "Hysteresis Models for Reinforced Concrete," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 108, No. ST5, 1982, pp. 1077-1087.
9. Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N., "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 96, No. ST12, 1970, pp. 2557-2572.

10. Park, R., Kent, D. C., and Sampson, R. A., "Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 98, No. ST7, 1972, pp. 1341-1359.

11. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1972.

12. 박홍근, 임태성, "휨지배 철근콘크리트 부재의 편칭과 에너지소산능력," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 15, No. 4, 2003, pp. 594-605.

13. 임태성, 박홍근, "휨지배 철근콘크리트 부재의 에너지 소산능력 평가방법," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 14, no. 4, 2002, pp. 566-577.

14. 임태성, 박홍근, "철근콘크리트 휨재에 대한 에너지 소산능력 산정식의 개발," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 14, no. 6, 2002, pp. 989-1000.

15. 한상환, 이리형, "철근콘크리트 보통모멘트 골조 기둥의 거동평가," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 14, no. 2, 2002, pp. 199-206.

16. Abrams, D. P., "Influence of Axial Force Variations on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.3, 1987, pp. 246-254.

17. Brown, R. H. and Jirsa, J. O., "Reinforced Concrete Beams under Load Reversals," *ACI Structural Journal*, Vol.68, No.5, 1971, pp. 380-390.

18. Cheok, G. S. and Stone, W. C., "Behavior of 1/6-Scale Model Bridge Columns Subjected to Inelastic Cyclic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol.87, No.6, 1990, pp. 630-638.

19. Park, R. and Thompson, K. J., "Behavior of Prestressed, Partially Prestressed and Reinforced Concrete Interior Beam-Column Assemblies under Cyclic Loading: Test Results of Unit 1 to 7," Research Report 74-9, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 1974, pp. 42.

20. Wehbe, N. I., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H., "Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.2, 1999, pp. 248-258.

21. Wight, J. K. and Sozen, M. A., "Strength Decay of RC Columns under Shear Reversals," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 101, No.

ST5, 1975, pp. 1053-1065.

22. 임혜정, 박홍근, 임태성, "내진 설계를 위한 에너지 소산량 산정법의 활용," 한국지진공학회 논문집, Vol. 7, No. 6, 2003, pp. 109-117.

23. V. Prakash, G. H. Powell, and S. Campbell, "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide-Version 1.10," University of California, Report No. UCB/SEMM-93/17, November, 1993.

24. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, INC, 1992.

25. Priestley, M. J. N, "Performance Based Seismic Design," *Proceedings, 12th WCEE*, Auckland, New Zealand, 2000.

부 록 : 에너지 소산량 산정식

박홍근과 임태성의 최근연구⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾에서 개발된 철근콘크리트 단면에서의 에너지 소산능력평가식을 나타내면 다음과 같다.

$$e_D = 2R_B f_y A_{s2} \left[(\phi_m^+ - \phi_m^-) h_s - \left(3 + \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \right) \epsilon_y \right] \quad (A1)$$

여기서, R_B = 철근의 바우싱거효과(Bauschinger effect)에 의한 에너지 소산능력의 저감을 나타내는 계수로 0.75, f_y = 철근의 항복강도, ϵ_y = 철근의 항복변형률, A_{s1}, A_{s2} = 양단부에 배치된 철근 중 각각 많은 쪽과 적은 쪽의 철근량, h_s = 양 단부 철근 사이의 거리, ϕ_m^+, ϕ_m^- = 비대칭 주기거동시 서로 다른 두 방향의 최대이력곡률이다. 에너지 소산량은 항상 양(+)이어야 하므로 식 (A1) 은 항상 0 보다 크거나 같아야 한다.

웹에 철근이 있는 단면에 대한 에너지소산량의 평가는 참고문헌 14 에 기재된 방법을 사용할 수 있다.

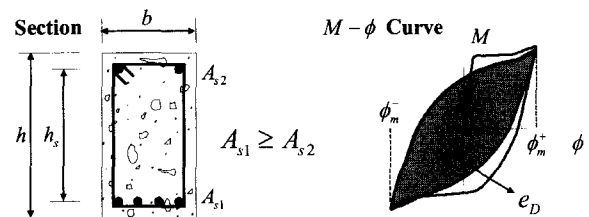


그림 A1 Energy dissipation capacity of RC members during cyclic loading