

모멘트-곡률 관계에 기초한 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of RC Beams under Cyclic Loading Based on Moment-Curvature Relationship

곽 호 경*
Kwak, Hyo-Gyoung

김 선 필**
Kim, Sun-Pil

요 지

이 논문에서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 거동을 모사하기 위한 모멘트-곡률 관계를 제안하고 있다. 기존의 제안된 모멘트-곡률 관계 모델이나 적층단면법과는 달리 제안된 모델은 부착-슬립관계와 상응하는 평형방정식을 기초로 하여 구성된 단조증가 하중에 대한 모멘트-곡률 관계를 이용하여 부착-슬립에 따른 영향을 고려하고 있다. 또한 대변형 해석시 보다 개선된 결과를 얻기 위해 철근의 응력-변형률 관계에 착안한 곡선화 된 천이곡선을 사용하고 있다. 응력-변형률 관계에 기초하여 단면을 가상의 층상구조로 모사하는 적층단면법과 비교하여 제안된 모델은 단면의 거동을 모멘트-곡률 관계로 표현하는 관계로 대형구조물의 해석시 계산시간과 저장공간을 줄일 수 있는 잇점을 가지고 있다. 나아가 고정단회전과 pinching 효과를 고려하기 위한 제안된 기본모델의 수정방안이 소개되고 있다. 마지막으로 제안된 모델식의 타당성을 검증하기 위하여 해석결과와 실험값들의 비교가 이루어졌다. 본 논문은 구조물의 미시적 측면에서 유효평균탄성계수를 결정하기 위한 균질화기법인 점근적 방법을 적용하였고, 탄성값을 조사하기 위하여 유한요소법으로 정식화하였다. 수치 예로서 물성치가 각기 다른 등방성 재료를 적용한 부재의 임의 단면에서 단위요소를 해석영역으로 설정하고 산출된 탄성계수를 기존의 해석방법으로부터 산출된 값과 비교하였다. 균질화기법으로 산출된 탄성계수는 과소평가되어 나타나며, 이는 해석영역을 유한요소정식화하는 과정에서 수정항만큼 차이가 난다는 것을 증명하였다. 기존 해석방법으로는 복합재료의 탄성계수가 단순히 재료의 산술적 평균값으로 계산되는 것과는 달리, 미시적으로 복합재 단위요소의 반복성을 고려함으로써 제안된 해석방법이 보다 유용하다는 것을 보여 주었다.

핵심어 : 철근콘크리트 보, 반복하중, 부착-슬립, pinching 효과, 고정단 회전, 모멘트-곡률 관계

Abstract

A moment-curvature relationship to simulate the behavior of reinforced concrete beam under cyclic loading is introduced. Unlike previous moment-curvature models and the layered section approach, the proposed model takes into consideration the bond-slip effect by using monotonic moment-curvature relationship constructed on the basis of the bond-slip relation and corresponding equilibrium equation at each nodal point. In addition, the use of curved unloading and reloading branches inferred from the stress-strain relation of steel gives more exact numerical result. The advantages of the proposed model, comparing to layered section approach, may be on the reduction in calculation time and memory space in case of its application to large structures. The modification of the moment-curvature relation to reflect the fixed-end rotation and pinching effect is also introduced. Finally, correlation studies between analytical results and experimental studies are conducted to establish the validity of the proposed model.

Keywords : reinforced concrete beam, cyclic loading, bond-slip, pinching effect, fix-end rotation, moment-curvature relation

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과, 부교수
** 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

* 이 논문에 대한 토론을 2000년 9월 30일까지 본 학회에
보내주시면 2000년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 생산활동 및 사회생활에 필요한 수많은 대형 구조물과 시설물들이 건설되었으며, 앞으로도 복잡하고 대형인 구조물이 지속적으로 건설되어 질 전망이다. 최근 들어 풍하중과 지진하중 등 반복하중으로 인한 구조물의 붕괴가 빈번해 지고 있는 상황에서, 건축구조물과 토목구조물에 대한 내진설계 규정의 강화와 극한하중에 대한 구조물의 저항력 및 연성(ductility)의 확보에 대한 필요성 또한 증가하고 있다. 따라서 반복하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 거동분석과 이를 위한 효과적인 동적-비선형 거동 해석기법의 개발 또한 활발히 이루어지고 있다. 특히 실험을 통해 콘크리트 구조물의 거동특성을 예측할 경우 상대적으로 정확하고 실제적인 거동을 파악할 수 있는 반면 비용과 시간이 많이 소요되고 광범위한 정보를 얻는데 매우 제한적이다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 비교적 간편하게 정확한 결과를 얻을 수 있으며 비용과 시간을 절약할 수 있는 수치해석 연구가 병행되고 있다.

구조물의 비선형 해석은 선형해석과는 달리 반복해석을 위한 시간이 많이 소요되고 하중증가에 따른 구조계의 형상 및 재료성질의 변화에 따라 극한하중에 근접할수록 수치적인 불안정성이 증가하므로 실제 구조물에 적용하기 위해서는 간편하고 안정적이며 효과적인 해석기법을 개발할 필요가 있다. 보 구조물의 비선형 해석시 널리 사용되는 적층단면법의 경우 완전부착상태를 가정하게 됨으로써 철근콘크리트의 에너지흡수능력을 과대평가하게 되고, 구조물이 대형화될 경우 해석시 많은 저장공간과 계산시간을 필요로 하게 되므로 비경제적이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 모멘트-곡률 관계에 기초한 해석모델이 제안되어 오고 있다. 그러나 기존에 Clough⁵⁾, Takeda¹⁷⁾, Meyer⁸⁾에 의해 제안되었던 모델들의 경우 모델을 구성하기 위한 초기 강성을 완전부착상태를 가정하여 구성하였고, 하중이력을 직선으로 표현함으로써 철근콘크리트의 에너지흡수능력을 과대평가하는 경향을 나타내었다.

따라서, 이 연구에서는 모델에 사용되는 초기강성을 부착-슬립효과가 반영된 강성을 사용하였으며, 하중이력을 직선이 아닌 곡선으로 표현함으로써 계산시간을 효과적으로 줄이면서 반복하중을 받는 철근콘크리트 보 구조물의 거동을 보다 정확히 모사할 수 있는 모델

을 제안하였다. 또한 구조물이 전단에 의해 지배될 경우 발생하는 pinching효과와 부재의 고정단에서 발생하는 회전량을 고려하여 제안된 모델식을 보정하였다. 나아가 실험값과 제안된 모델에 의한 해석결과를 비교, 검토함으로써 제안된 모델의 효율성을 검증하였다.

2. 재료모델

2.1 콘크리트

그림 1에서 보는 바와 같이 이 연구에서 하중의 단조증가에 따른 압축축의 응력-변형률 곡선을 정의하는 모델로서 Kent와 Park에 의해 제안되고 이후 Scott에 의해 수정된 모델을 사용하였다.¹⁶⁾ 현재 보다 정확한 콘크리트 모델이 제안되어 있음에도 불구하고 이 모델은 간편하면서도 스테럽 등의 횡보강 철근에 따른 영향을 효과적으로 고려하면서 해석의 정확성을 기할 수 있는 모델로 인정 받고 있으며 비선형 해석시 널리 사용되고 있다. 각 영역별로 정의된 응력-변형률 곡선의 식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = Kf'_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma_c = Kf'_c [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_0)] \quad \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u \quad (2)$$

$$\sigma_c = 0.2Kf'_c \quad \epsilon_c \geq \epsilon_u \quad (3)$$

여기서

$$\epsilon_0 = 0.002K \quad K = 1 + \frac{\rho f_{yh}}{f'_c} \quad (4)$$

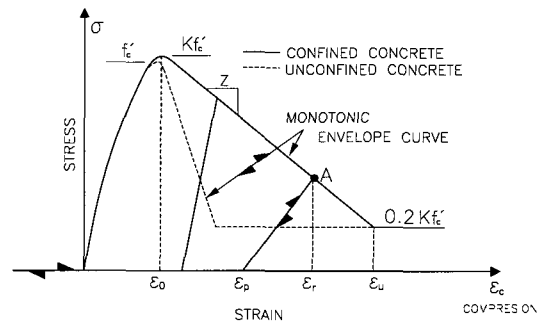


그림 1 콘크리트의 응력-변형률 관계

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.0284f'_c}{14.21f'_c - 1000} + 0.75 \rho_s \sqrt{\frac{k'}{s_h}} - 0.002K} \quad (5)$$

ϵ_0 는 최대응력에 대한 변형률을 나타내며, K 는 스테럽에 의한 강도증가를, Z 는 변형연화의 기울기를 나타내는 계수로서 kg, cm로 나타내었으며, f'_c 은 콘크리트의 최대 강도를, f_{yh} 는 스테럽의 항복강도를, ρ_s 는 스테럽 외측에서 측정된 코어콘크리트의 체적에 대한 스테럽의 체적비를, k' 은 콘크리트 코어의 두께를, s_h 는 스테럽 중심간의 거리를 나타낸다. 피복 콘크리트의 파쇄파괴(crushing failure)를 나타내기 위하여 변형률이 ϵ_u 을 넘어서게 되면 콘크리트의 강도가 $0.2f'_c$ 로 줄어들도록 하였으며, ϵ_u 의 값을 0.005로 가정하였다.

작용하는 하중이 재하(unloading)되면 응력 감소에 따른 변형률의 감소가 나타나는데 이를 모사하기 위하여 Karsan과 Jirsa⁶⁾에 의해 제안된 직선관계로 단순화된 재하관계를 사용하였으며, 대응되는 소성변형률(그림 1 참조)을 계산하기 위한 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} = 0.145 \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}\right)^2 + 0.13 \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}\right), \quad \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}\right) < 2 \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} = 0.707 \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0} - 2\right) + 0.834, \quad \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}\right) \geq 2 \quad (7)$$

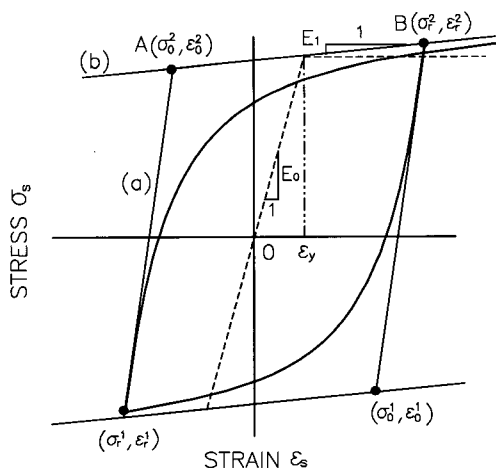


그림 2 철근의 응력-변형률 관계

여기서 ϵ_r 은 재하가 시작되는 변형률(그림 1의 점A)을 의미한다.

다시 하중이 재하되면(reloading) 압축변형도가 ϵ_p 보다 작을 경우 균열이 열려있는 상태를 나타내므로 응력이 0(zero)이 되며, 일단 변형률이 ϵ_p 보다 커지게 되면 전 이력(hysteretic)경로를 따라 응력이 증가하게 된다.

2.2 철근

철근은 콘크리트에 비해 재료성질이 균일하게 정의되므로 모델의 단순화를 위하여 항복점 (ϵ_y, f_y)을 중심으로 두개의 직선구간으로 표현되는(bilinear) 응력-변형률 관계를 사용하였으며, 그림 2에서 정의된 항복 발생 후의 기울기(E_1)는 모델의 변형에너지가 실험에서 얻어지는 변형에너지와 동일하게 할 수 있는 값을 사용하였다. 또한 반복하중에 따른 재료거동을 모사하기 위해 Giffre-Menegotto-Pinto^{9),13)} 모델을 사용하였으며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma^* = b \cdot \epsilon^* + \frac{(1-b) \cdot \epsilon^*}{(1 + \epsilon^{*R})^{\frac{1}{R}}} \quad (8)$$

여기서 ϵ^* 와 σ^* 는 표준화된(normalized) 변형률과 응력으로 $\epsilon^* = \frac{\epsilon - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r}$, $\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$ 로 표현된다.

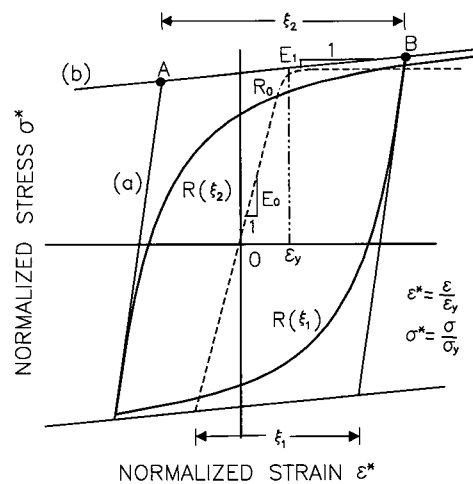


그림 3 R값의 정의

식(8)은 기울기가 E_0 와 E_1 인 직선을 점근선으로 하는 곡선의 천이를 나타낸다. 그리고 σ_0 와 ϵ_0 는 두 점근선의 교차점을 나타내며 σ_r 과 ϵ_r 은 최근의 전환(reverse)된 응력과 변형률을 나타낸다. b 는 변형경화 비율로서 E_0 과 E_1 의 비율을 나타내며, R 은 천이곡선(transition curve)에 영향을 줄 수 있는 계수로서, Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 계수로서 현재 점근선의 교차점과 이전전환점 중 최대 또는 최소값을 갖는 전환점과의 차이에 의해 결정되며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R = R_0 - \frac{a_1 \cdot \xi}{a_2 + \xi} \quad (9)$$

여기서 ξ 값은 그림 3과 같이 정의되며, R_0 , a_1 , a_2 는 실험에 의해 결정되는 계수이다.

3. 모멘트-곡률 관계

3.1 모멘트-곡률 관계식의 구성

기존의 Clough⁵⁾, Takeda¹⁷⁾, Meyer⁸⁾ 등에 의해 제안된 모멘트-곡률 관계 모델은 대부분 직선으로 제안되어 있어서 실제로 철근의 Bauschinger 효과에 의해 나타나는 곡선의 형태와는 다른 거동을 나타내고, 완전부착 상태를 가정한 휨강성을 사용하고 있으므로 부착-슬립의 효과를 반영할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이 연구에서는 기존에 제안된 모델들의

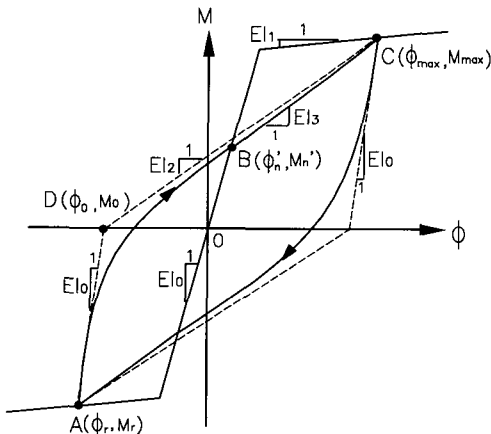


그림 4 제안된 모멘트-곡률 관계 모델식

문제점들을 개선하여 실제에 더 가까운 거동을 나타낼 수 있는 모델을 제안하였으며, 대변형을 유발하는 반복하중 하에서는 모멘트-곡률 관계가 대부분 철근에 의해 지배된다는 점에 착안하여 모델식을 구성하였다.

모델식은 크게 두 단계로 나누어 구성되는데, 먼저 참고문헌¹⁾에 의해 제안된 방법에 따라 부차슬립을 고려한 단조증가하중(monotonic loading)에 대한 보부재의 모멘트-곡률 관계를 구성하여 이를 두개의 직선구간으로 간편화시키고, 다음 단계로 간편화된 모멘트-곡률 관계를 이용하여 반복하중에 대한 모멘트-곡률 관계의 기본모델을 구성하였다. 그리고 전단의 영향이 큰 경우와 보-기둥접합부에서 강제 처짐이 발생하는 경우, 단면이 대칭이 아닌 경우에는 제안된 모델을 보정하여 그 효과를 반영하였다.

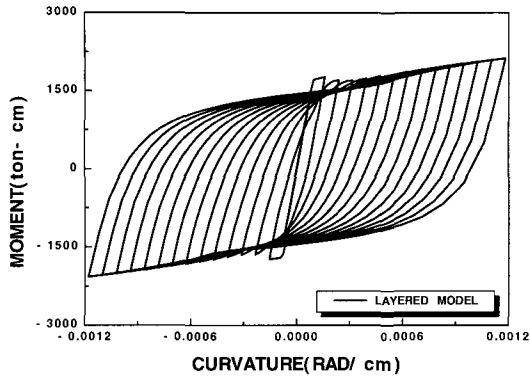
반복하중에 대한 모멘트-곡률 관계의 기본모델은 크게 3부분으로 나누어져 구성된다.

- (a)의 경우(점 A-점 B의 곡선구간) : 곡률이 전환(reverse)된 점 A(ϕ_r, M_r)를 출발하여 단조증가에 대한 모멘트-곡률 관계(점 B(ϕ_n, M_n))를 초과하지 않는 영역으로서 다음의 식으로 정의된다.

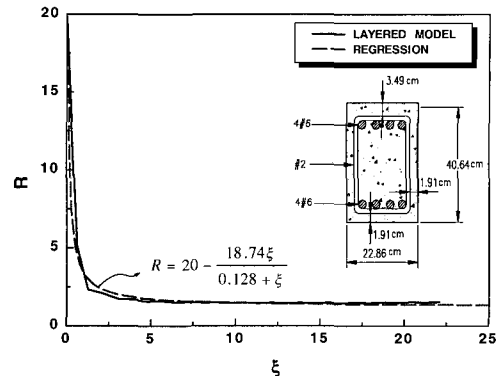
$$M^* = b \cdot \phi^* + \frac{(1-b) \cdot \phi^*}{(1 + \phi^{*R})^R} \quad (10)$$

여기서, $\phi^* = \frac{\phi - \phi_r}{\phi_0 - \phi_r}$, $M^* = \frac{M - M_r}{M_0 - M_r}$ 이다.

식(10)은 기울기가 EI_0 와 EI_2 인 직선을 점근선으로 하는 곡선의 천이를 나타낸다. EI_0 는 하중의 단조증가상태에서 항복하기 전의 휨강성을 나타내며, EI_2 는 EI_0 를 기울기로 하는 점근선이 곡률축과 만나는 점 D(ϕ_0, M_0)와 이전에 경험했던 최대이력 점 C(ϕ_{max}, M_{max})을 잇는 점근선의 기울기를 나타낸다. b 는 변형경화 비율로서 EI_0 과 EI_2 의 비율을 나타내며, R 은 천이곡선(transition curve)에 영향을 줄 수 있는 계수로서, Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 계수이다. 그리고 점 D(ϕ_0, M_0)와 점 A(ϕ_r, M_r) 값은 변형률이 전환될 때 마다 새롭게 구성된다. 특히 식(10)과 식(8)의 비교에서도 알 수 있듯이 이 구간에서의 모멘트-곡률 관계는 철근의 응력-변형률 관계



(a) 적층단면법을 이용한 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계



(b) 철근콘크리트 보 단면의 R값과 xi 값과의 관계

그림 5 R값의 결정

와 동일한 형태로 표현하였다. 이는 철근콘크리트 단면의 반복하중 해석시 변형이 증가함에 따라 단면의 모멘트-곡률 관계는 철근의 응력-변형률 관계와 직접적인 비례관계를 갖는 반면 콘크리트에 의한 단면 저항력은 극히 작게 나타나는 현상에 기초한 것이다.

모멘트-곡률 관계의 곡선은 R값의 변화에 따라 영향을 받게 되는데 R값은 현재 점근선의 교차점과 이전 전환점 중 최대 또는 최소값을 갖는 전환점과의 차이에 의해 결정된다. 철근의 경우 재료상수인 R_0 , a_1 , a_2 값과 하중이력에 따른 ξ 의 함수로 정의되는 반면 철근콘크리트 단면의 경우에는 여러 가지 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 그 값을 정의하기가 용의하지 않다. 따라서 이 연구에서는 적층단면법을 이용하여 하중이력에 따른 R과 ξ 의 관계를 구성하고, 구성된 단면의 이력에 대하여 비선형 회귀분석을 수행하여 식(9)을 만족하는 a_1 , a_2 를 계산하여 사용하였다. 여기서 R_0 의 값은 철근과 같은 값을 사용하였으며, 단면이 대칭이 아닌 경우에는 작은 철근비를 갖는 대칭단면을 기준으로 하여 결정하였다. 이 과정을 통한 임의의 철근콘크리트 단면에서 결정된 R값을 그림 5에 나타내었다.

- (b)의 경우(점 B-점 C구간) : 곡률이 전환된 점 A (ϕ_r, M_r)를 출발한 천이곡선이 단조포락선상의 점 B (ϕ'_n, M'_n)을 넘어섰지만 아직 이전 최대이력 점 C (ϕ_{max}, M_{max})는 넘어서지 않은 영역으로 다음과 같이 직선으로 정의하였다.

$$M = EI_3 \cdot \phi + (M_{max} - EI_3 \cdot \phi_{max}) \quad (11)$$

여기서 EI_3 는 천이곡선과 단조포락선이 만나는 점 B (ϕ'_n, M'_n)과 점 C (ϕ_{max}, M_{max})를 잇는 직선의 기울기이다.

- (c)의 경우(점 C이후 구간) : 곡률이 전환된 점 A (ϕ_r, M_r)를 출발한 곡선이 이전 최대이력 점 C (ϕ_{max}, M_{max})를 넘어 새로운 최대변형이 발생한 영역으로 다음과 같이 직선으로 정의하였다.

$$M = EI_1 \cdot \phi + (M_{max} - EI_1 \cdot \phi_{max}) \quad (12)$$

여기서 EI_1 은 단조포락선의 항복상태 이후 휨강성을 나타낸다.

3.2 전단에 대한 영향이 클 경우

실험을 통하여 널리 알려진 바와같이 전단력이 작용할 경우 pinching현상이 발생하게 되는데 Ma et al.⁷⁾과 Popov et al.¹⁴⁾의 연구 결과에 따르면 이 pinching현상의 정도는 단면에 작용하는 전단력의 크기와 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다. 즉 전단력이 매우 작을 경우 pinching현상이 일어나지 않으며, 전단력이 증가함에 따라 원점까지 곡률축을 따라 모멘트-곡률의 이력이 진행된다. 따라서 전단이 지배적으로 나타나는 일반구조물의 경우 pinching현상의 정도는 이 두 가지 극한 상태사이에서 발생하게 된다.

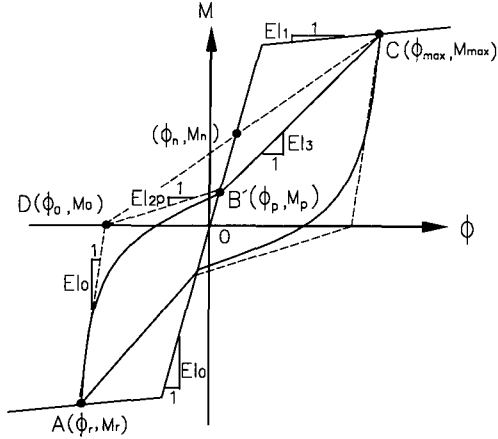


그림 6 전단의 영향을 고려한 보정된 모델식

따라서 그림 4의 점 A-점 B구간을 정의함에 있어 사용했던 점 C (ϕ_{max} , M_{max})와 점 D (ϕ_0 , M_0)를 토대로 구성된 점근선의 기울기 EI_2 를 점 D (ϕ_0 , M_0)와 점 B' (ϕ_p , M_p)를 잇는 점근선의 기울기 EI_{2p} 로 수정하여 전단에 따른 pinching 효과를 반영하였다. 특히 점 B' (ϕ_p , M_p)는 실험식에 따라 전단경간비율 a/d 에 대한 함수로 결정되어 질 수 있는데 이 연구에서는 Meyer¹⁵⁾가 제시한 관계식을 토대로 점 B' (ϕ_p , M_p)를 결정하였다.

$$M_p = \alpha_p M_n, \quad \phi_p = \alpha_p \phi_n \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{a}{d} < 1.5 \text{ 일 경우} & \quad \alpha_p = 0 \\ 1.5 < \frac{a}{d} < 4.0 \text{ 일 경우} & \quad \alpha_p = 0.4 \frac{a}{d} - 0.6 \\ \frac{a}{d} \geq 4.0 \text{ 일 경우} & \quad \alpha_p = 1 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 α 전단경간의 길이, d =단면의 깊이이다.

3.3 강체회전에 의한 처짐의 보정

부재의 내부에 위치한 임의의 점에서 정의되는 모멘트-곡률 관계를 보-기둥 접합부와 같은 고정단에 적용하게 되면 철근의 정착영역(anchorage zone)에서 발생되는 슬립(slip)에 의해 고정단이 회전하게 되고, 이로 인한 강체거동(rigid body motion)에 의해 추가적인 처짐이 발생하게 되므로 실제 구조물의 거

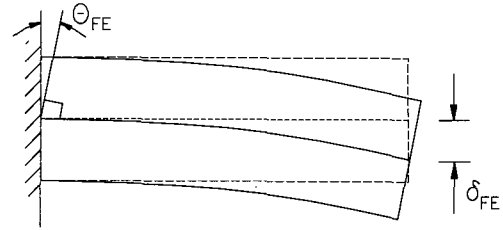


그림 7 보-기둥 접합면에서의 강체 변형

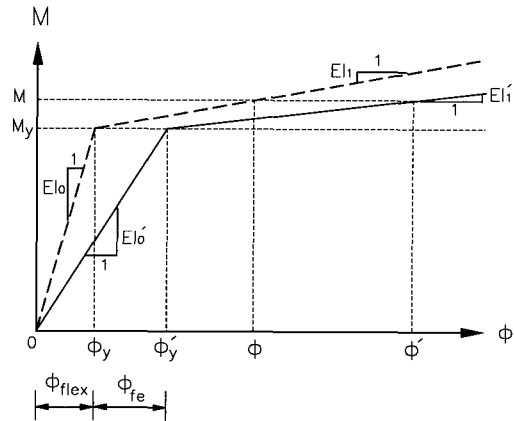


그림 8 강체회전이 존재할 경우 보정된 모델식

동과 해석모델에 의한 수치결과와는 다소 차이를 나타내게 된다. 이러한 현상을 반영하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

만약 실험에 의해 고정단의 회전에 의한 처짐 δ_{fe} 가 결정되어져 있는 경우 휨거동에 의한 δ_{flex} 처짐과 고정단의 회전에 의한 처짐 δ_{fe} 와의 관계가, 휨거동에 의한 곡률 ϕ_{flex} 과 고정단의 회전에 의한 처짐 δ_{fe} 를 반영하기 위한 가상의 곡률 ϕ'_{fe} 와의 관계와 같다고 가정하면 다음과 같이 항복곡률 ϕ_y , 휨강성 EI_0 , EI_1 의 값을 보정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{fe} + \delta_{flex}}{\delta_{flex}} &= \frac{\phi_{fe} + \phi_{flex}}{\phi_{flex}} = \frac{\phi'}{\phi_{flex}}, \\ \text{즉 } \phi' &= \alpha_{fe} \phi_{flex} = \frac{\delta_{fe} + \delta_{flex}}{\delta_{flex}} \phi_{flex} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\phi_{flex} = \phi_y$ 로 놓으면

$$\phi'_y = \alpha_{fe} \phi_y \quad (16)$$

$$M_y = EI_0 \phi_y = EI'_0 \phi'_y = EI'_0 \alpha_{fe} \phi_y,$$

즉 $EI'_0 = \frac{EI_0}{\alpha_{fe}}$ (17)

$$M - M_y = EI_1 (\phi - \phi_y) = EI'_1 (\phi' - \phi'_y),$$

즉 $EI'_1 = EI_1 \frac{\phi - \phi_y}{\phi' - \phi'_y} = \frac{EI_1}{\alpha_{fe}}$ (18)

한편 δ_{fe} 가 실험에 의해 결정되어져 있지 않을 경우 Oh^{10} 에 의해 제안된 철근의 응력과 균열 사이의 관계를 이용하여 철근항복시 균열폭을 구하고 이 균열폭의 절반을 Δ_{fe} 라 하면, δ_{fe} 는 다음과 같은 식으로 계산되어질 수 있다.

$$\theta_{fe} = \frac{\Delta_{fe}}{d-c} \quad \delta_{fe} = \theta_{fe} L \quad (19)$$

여기서 c 값은 등가응력블럭을 사용하여 철근이 항복할 때의 중심축을 구해 내거나 철근의 항복 상태에서 휨부재의 중립축이 $0.4d$ 내외에서 위치하게 되므로 이를 토대로 $c=0.4d$ 로 가정될 수 있다.

3.4 단면이 대칭이 아닌 경우에 대한 보정

기존의 모델에서는 모멘트가 (-)일 경우의 포락선으로 모멘트가 (+)일 경우의 포락선을 원점대칭시켜 사용하도록 하고 있다. 반면 단면이 대칭이 아닐 경우, 압축축과 인장축의 휨강성과 항복모멘트가 동일하

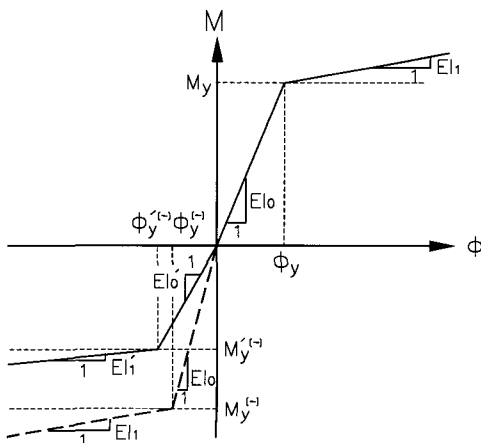


그림 9 단면이 대칭이 아닌 경우 보정된 모델식

지 않기 때문에 보정된 모델에서는 실험이나 수치해석을 통하여 얻어진 모멘트가 (-)일 경우의 포락선을 토대로 단면의 휨강성을 결정하게 된다. 즉 보정된 휨강성을 EI'_0 , EI'_1 이라고 하면, 점근선의 기울기를 보정하는 데 있어서는 하중재하(reloading)시 EI_0 대신 EI'_0 를, 하중제하(unloading)시 EI_1 대신 EI'_1 를 사용하였다.

4. 유한요소의 이상화

이 연구에서는 변위장을 정의함에 있어 Timoshenko 보이론을 사용하였다. 철근콘크리트 보 구조물을 유한요소로 모델링 함에 있어서 축방향 변형과 비선형 거동에서 콘크리트의 전단에 따른 영향을 고려하지 않았으며, 하중증가에 따른 비선형 거동은 휨강성의 변화에 기인하는 것으로 가정하였다. 이와 같은 가정에 따라서 보요소의 임의의 위치에서의 평면 응력-변형률 관계로부터 내력인 모멘트 M 과 전단력 Q 를 산정한 후 가상일의 원리를 적용하면 보요소와 관련한 평형 방정식 및 외력을 구성할 수 있으며 이와 관련한 자세한 유도과정은 참고문헌¹¹⁾에 자세히 명시되어 있다.

하중증가에 따른 구조거동을 파악함에 있어 하중조절방법 가운데 하중단계를 구분하고 각 단계에서의 정확한 결과를 얻기 위해 반복법을 사용하는 복합법(combined incremental-initial method)를 적용하였으며, 반복과정에서의 수렴여부는 발생한 전체 변위의 자승합에 대한 변위증분의 자승합이 오차한계 이하일 경우 수렴하는 것으로 한 다음 관계식을 사용하였다.

$$E_d \frac{[\sum_j (\Delta d_j^i)^2]^{0.5}}{[\sum_j (d_j^i)^2]^{0.5}} \leq TOLER \quad (20)$$

여기서 i 는 반복횟수, j 는 자유도 번호, d_j^i 는 그에 해당하는 Δd_j^i 는 그에 해당하는 변위증분, 그리고 $TOLER$ 는 오차의 한계를 나타낸다.

5. 철근콘크리트 보의 해석

이 연구에서는 실험으로 거동이 검증된 3개의 철근콘크리트 보에 대하여 각각 모멘트-곡률 관계를 구성하고 이를 토대로 부재해석을 수행하여 그 결과를 비교

하였다. 여기서 사용된 3개의 철근콘크리트 보의 구속조건이 단순 지지인 경우와 고정단인 경우, 전단력이 영향이 큰 경우와 크지 않은 경우에 대해 검토하기 위하여 사용되었다. 비교에 사용된 구조계는 Bertero, Bresler와 Liao³⁾에 의해 실험된 BEAM1부재, Ma, Bertero와 Popov⁷⁾에 의해 실험된 BEAMR5, BEAMR6부재이며, 각각의 재원과 재료 성질은 해석결과에 앞서 제시하였다.

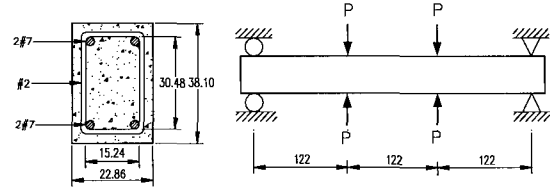


그림 10 BEAM1의 재원(단위 cm)

5.1 BEAM1

BEAM1는 구속조건이 단순 지지이고, 중앙부에는 순수 휨만 작용하며, 압축철근과 인장철근의 비율이 같은 철근콘크리트 보이다. 콘크리트에 발생하는 주균열의 평균적인 발생 간격이 피복 두께의 3배정도라고 볼 때 요소의 길이가 이 값보다 작아지더라도 이상 요소 세분화에 따른 정확도의 개선을 기대할 수 없으며⁴⁾ 또 요소의 수가 많아지면 저장용량과 계산과정에 걸리는 시간 또한 기하급수적으로 증가하므로 유한요소 해석시 한 부재의 길이는 이점들을 고려하여 10cm로 선정하였다. BEAM1의 경우 중앙부에서 순수한 휨을 받기 때문에 소성힌지길이(plastic hinge length)가 길게 형성되므로 이에 따른 영향은 추가적으로 고려하지 않았다.

완전부착상태를 가정한 적층단면법과 이 연구에서 제안한 모델에 의해 얻어진 모멘트-곡률 곡선을 비교해 보면 그림 11(A)와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 부착슬립에 따른 영향은 변형이 증가함에 따라 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 그림 11(B)에서

표 1 BEAM1의 재료성질

	탄성계수 (kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	철근비 (Ast/bd)
콘크리트	318,770	312	-
압축철근	2,003,737	3,304	0.00988
인장철근	2,003,737	3,304	0.00988

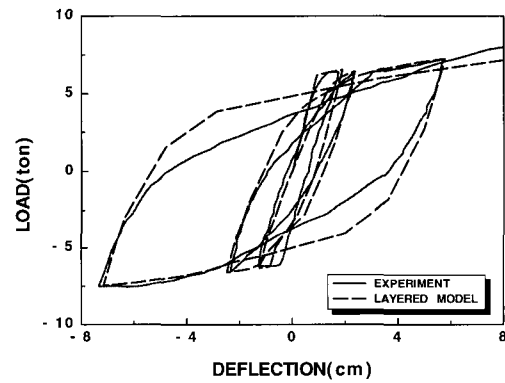
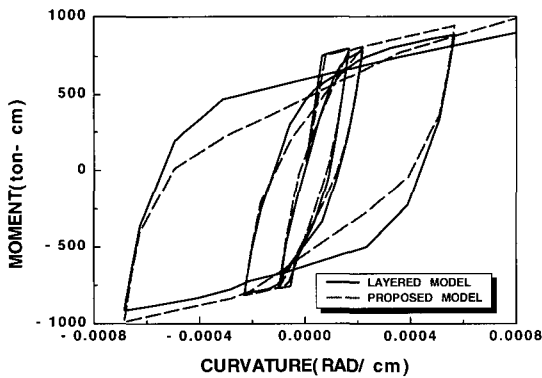
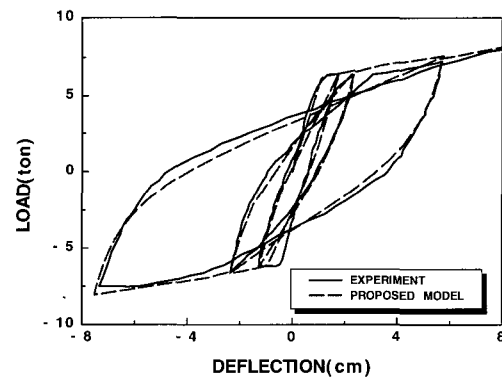


그림 12 BEAM1의 적층단면법에 의한 하중-처짐 관계



(a) 모멘트-곡률 관계



(b) 하중-처짐 관계

그림 11 BEAM1의 제안된 모델에 의한 모멘트-곡률, 하중-처짐 관계

보는 바와 같이, 이 연구에서 제안한 모멘트-곡률 관계 모델을 사용하여 구조물의 해석을 수행할 경우, 부착-슬립(bond-slip) 효과를 고려하게 되어 부재의 에너지흡수능력 측면에서 완전부착을 가정한 적층단면법에 의한 결과(그림 12참조)에 비해 보다 개선된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5.2 BEAMR6

BEAMR6는 구속조건이 고정단이고, 휨과 전단력이 동시에 작용하며, 압축철근과 인장철근의 비율이 같은 철근콘크리트 보이다. BEAMR6과 같은 외팔보를 유한요소 해석하는데 있어서 특히 고려해야 할 사항중에 하나가 요소의 길이를 결정하는 일이다. 만약 고정단 근처의 요소 길이를 소성힌지길이 이상으로 결정했을 경우 요소의 평균적인 변형이 과소평가되면서 모멘트-곡률 관계에서 낮은 곡률 구간의 큰 강성값을 이용하게 되어 부재의 강성이 크게 나타나며 항복강도 역시 과대평가 된다.¹⁾ 따라서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 소성힌지길이 개념을 이용하여 구조물을 모델링해야 할 필요가 있다. 이 연구에서는 Sawyer¹⁵⁾가 제안한 식 $L_p = 0.25d + 0.075z$ 을 이용하였다. 여기서 d =단면의 유효 길이이고, z =부재의 끝단에서 임계면까지의 거리를 의미한다.

소성힌지길이 개념과 주근열의 평균 발생 폭을 고려하였을 때 고정단부터 소성힌지길이인 20cm까지는 부재길이를 5cm로 모델링하고 나머지 구간은 BEAM1과 같은 10cm로 모델링 하여 유한요소해석을 수행하였다.

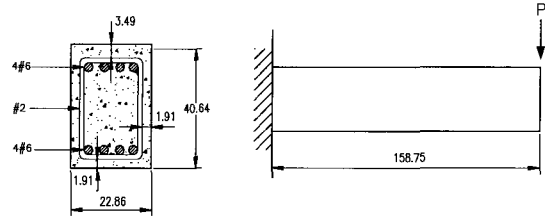


그림 13 BEAMR6의 재원(단위 cm)

표 2 BEAMR6의 재료성질

	탄성계수 (kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	철근비 (Ast/bd)
콘크리트	253,104	312	-
압축철근	2,046,625	4,605	0.014
인장철근	2,046,625	4,605	0.014

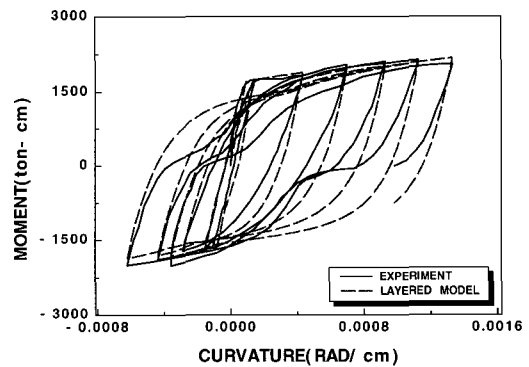
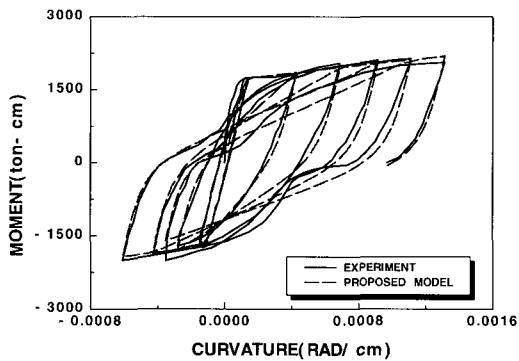
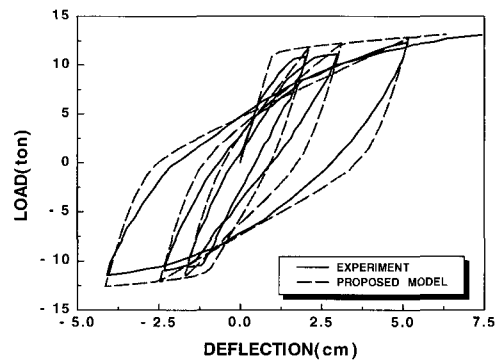


그림 14 BEAMR6의 적층단면법에 의한 모멘트-곡률 관계



(a) 모멘트-곡률 관계



(b) 하중-처짐 관계

그림 15 BEAMR6의 제안된 모델에 의한 보정 전 모멘트-곡률, 하중-처짐 관계

실험을 통해 산정된 모멘트-곡률 관계와 적층단면법을 토대로 계산된 모멘트-곡률 관계를 비교해 보면 그림 14와 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 순수한 휨이 작용하는 BEAM1과 달리 대상 구조부재의 경우 부차-슬립으로 인한 pinching현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 전단력이 작용하게 되면 전단변형이 유발됨과 함께 휨균열 이외에 전단균열이 함께 발생되기 때문에 철근과 콘크리트의 인접부분의 부착응력이 현저히 저하되어 일어나는 현상으로 판단된다.

이와는 달리 제안된 모멘트-곡률 관계 모델을 이용하여 구조물의 해석을 수행하면 그림 15와 같다. 모델식을 이용한 모멘트-곡률 곡선이 실제와 유사한 결과를 보임에도 불구하고, 이를 토대로 구성된 하중-처짐 관계는 실험치의 항복처짐값을 과소평가 하는 다소 다른 결과를 주는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 Roufaiel와 Meyer⁸⁾의 연구 결과에도 나타나고 있는데, 이는 유한요소해석시 고정단의 회전량이 0(zero)으로 가정됨에도 불구하고, 실제 실험에서는 고정단에서 강제회전량이 발생하기 때문이다. 즉, 보와 고정단의 인접면에서 주철근이 슬립되면서 발생된 회전량에 의한 강제 처짐량을 반영하지 못하고 있기 때문이다. 모델식에서 제안한 바와 같이 강제 처짐량을 반영한 후 하중-처짐 관계를 구성하면 그림 16과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 강제 처짐량을 반영할 경우 실제와 거의 일치하는 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 기둥-보 접합부의 유한요소모델링에서는 실제 거동에 보다 근접한 결과를 얻기 위해 강

체 처짐량의 영향이 반드시 반영되어야 함을 알 수 있다.

5.3 BEAMR5

BEAMR5는 구속조건이 고정단이고, 휨과 전단력이 동시에 작용하며, 압축철근과 인장철근의 비율이 같은 철근콘크리트 보이다. 그러나 BEAMR5의 천이곡선은 같은 단면을 가지고 있는 BEAMR6의 천이곡선과 비교해 보면 다른 점을 보이는 것을 알 수 있다. 즉 두 곡선이 원점을 향해 이동해 있는 Pinching현상이 일어나고 있지만 BEAMR5의 정도가 BEAMR6의 정도보다 더 심해지는 것을 알 수 있으며, 극한 하중도 BEAMR5의 경우가 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 BEAMR5의 경우 a/d 값이 2.75로써 휨거동에 대해 지배받기 보다는 전단거동에 의해 지배 받기 때문에 일어나는 현상으로, 기둥-보 접합부에 더 많은 전단력이 작용하게 되고 이로 인하여 발생된 더 큰 전단변형은 균열단면의 감소현상을 초래하여 전단강성을 저하시키기 때문이다⁷⁾. BEAMR5의 경우, 강제회전에 의한 처짐이 발생하고 전단에 의한 영향이 크므로 이에 대한 보정된 모멘트-곡률 관계 모델을 이용하여 구조물의 해석을 수행하면 그림 18과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 이 연구에서 제안된 모델이 전단력의 영향을 받는 철근콘크리트의 하중-처짐 관계도 효과적으로 모사하고 있음을 알 수 있다.

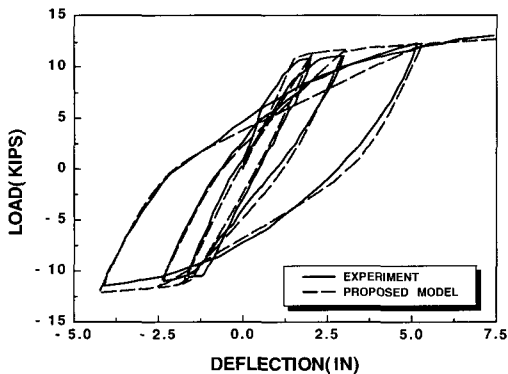


그림 16 BEAMR6의 강제 처짐 보정 후 제안된 모델에 의한 하중-처짐 관계

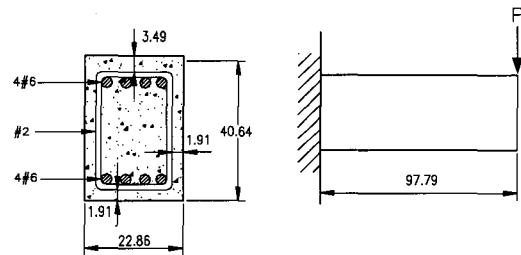


그림 17 BEAMR5의 재원 (단위 cm)

표 3 BEAMR5의 재료성질

	탄성계수 (kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	철근비 (Ast/bd)
콘크리트	302,320	312	-
압축철근	2,046,625	4,605	0.014
인장철근	2,046,625	4,605	0.014

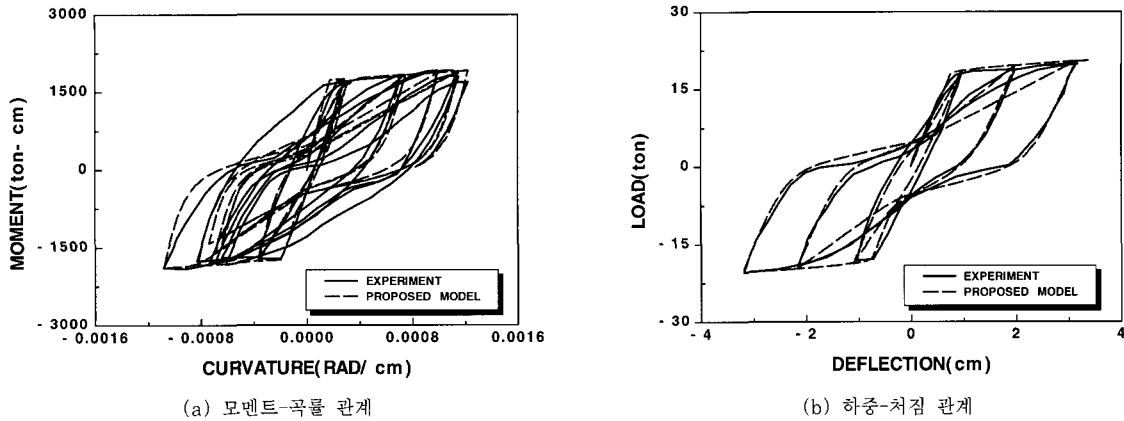


그림 18 BEAMR5보의 제안된 모델에 의한 모멘트-곡률, 하중-처짐 관계

6. 결 론

이 연구에서는 완전부착상태를 가정하고 해석시 많은 저장공간과 시간을 필요로 하는 적층단면법에 의한 해석을 지양하고 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 비선형 거동을 효율적으로 해석할 수 있는 모멘트-곡률 관계를 제안하였다. 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 관계는 철근의 거동에 크게 영향을 받는다는 점에 착안하여 철근의 모델을 토대로 하여 모멘트-곡률 관계 모델을 제안하였으며, 기존의 모델들과는 달리 단조증가 하중에 대한 휨강성을 구성하는 데 있어서 부착-슬립효과를 고려한 휨강성을 사용하였고, 철근의 Bauschinger 효과에 의해 나타나는 모멘트-곡률 관계의 특징을 나타내기 위하여 하중이력곡선을 직선이 아닌 곡선으로 정의하였다.

적층단면법에 의해 철근콘크리트 보 구조물의 거동의 해석을 수행해 본 결과, 구조물이 흡수할 수 있는 에너지량을 실제보다 과대평가 하고 있는 것을 알 수 있었다. 그리고 이 연구에서 제안된 모멘트-곡률 모델에 의해 해석을 수행해 얻은 결과들이 실제거동과 비슷한 결과를 나타낸 것을 볼 때, 이 연구에서 제안된 모델보다 더 큰 휨강성을 사용하고 하중이력을 곡선이 아닌 직선으로 사용하는 기존의 제안된 모멘트-곡률 관계의 모델들 역시 구조물이 흡수할 수 있는 에너지량을 실제보다 과대평가 하고 있는 것을 알 수 있었다.

또한 구조물이 전단력에 의해 크게 영향을 받고 있는 경우 전단강성의 저하에 의한 pinching 현상이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 보-기둥 접합부 같은 고

정단을 유한요소법으로 해석할 경우 해석시 고정단의 회전량을 0(zero)으로 가정하지만 실제로는 주철근의 슬립에 의한 고정단에서의 회전이 발생하고 이로 인하여 비교적 큰 처짐량이 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 이런 현상들이 고려되지 않았을 경우 해석결과에 큰 오류가 발생할 수 있으므로 이 연구에서는 이러한 경우에 대하여 모델식을 보정하여 사용함으로써 이러한 현상들을 해석 결과에 반영하였다.

마지막으로, 제안된 모델을 이용하여 해석을 수행한 결과 실제 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 거동을 해석하는 데 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 부재의 극한 저항력 이후 야기되는 반복하중에 따른 강도감소(strength degradation)현상에 대한 모사는 제안된 모델에 포함시키지 않았다.

감사의 글

이 논문은 과학기술부에서 지원한 국가지정 연구실 사업과 교육부에서 지원한 BK21 핵심사업의 연구비 지원에 의한 연구결과로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 곽효경, 김지은. "모멘트-곡률 관계에 기초한 철근콘크리트 보의 비선형 해석", 전산구조공학회, 제11권, 제4호, 1998, pp.295~307

2. 하기주, 곽효경, 김진근, "반복하중을 받는 철근콘크리트 부재단면의 특성에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제9권, 제2호, 1989, pp.457~462
3. Bertero, V. V., Liao, H., and Bresler, B., "Stiffness Degradation of Reinforced Concrete" Earthquake Engrg. Research Center Report No. EERC 69-12, Univ. of California, Berkeley, Calif., 1969
4. Chen, W. F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill Book Company, 1982
5. Clough, R. W. And Johnston, S. B., Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirments, *Proceedings of Japan Earthquake Engineering Symposium*, October 1966
6. Karson, I. D., and Jirsa, J. O. "Behavior of Concrete under Compressive Loading," *J. Structural Division*, ASCE, Vol. 95, December 1969
7. Ma, S. M., Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangural and T-beam," Earthquake Engrg. Research Center Report No. EERC 76-2, Univ. Of California, Berkeley, Calif., 1976
8. Magdy, S. L., Roufaiel and Christian Meyer, "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Frame," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No. 3, Mar, 1987
9. Menegotto M., and Pinto, P. E., Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frame Including Changes in Geometry and Nonelastic Behavior of elements under Combined Normal Force and Bending, *Proceedings, IABSE Symposium on "Resistance and ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads"*, Lisbon, 1973
10. Oh, B. H., "Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibers", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 10, 1982, pp.2821~2836
11. Owen, D. R. J. and Hinton, E., *Finite Elements in Plasicity*, Pineridge Press Limited, 1980
12. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1975
13. Pinto, P. E. and Giuffre', A., "Comportamento del Cemento Armato per Sollecitazioni Cicliche di Forte Intensita", *Giornale del Genio Civile*, No. 5, 1970
14. Popov, E. P., Bertero, V. V., and Krawinkler, H., "Cyclic behavior of three Reinforced Concrete Flexural Members with High Shear," Earthquake Engrg. Research Center Report No. EERC 72-5, Univ. of California, Berkeley, Calif., 1972
15. Sawyer, H. A., Design of Concrete Frames for Two Failure States, *Proceedings of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, ASCE-ACI, Miami, November, 1964, pp.405~431
16. Scott, B. D., Park, R. and Priestley, M. J. N , "Stress-Strain Behavoir of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," *ACI*, Vol. 79, No. 1, 1982, pp.13~27
17. Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N , "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 96, No. ST-12, December 1970

(접수일자 : 2000. 2. 10)