

변형율속도를 고려한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 동적 비선형 해석모델

Dynamic Nonlinear Analysis Model for Reinforced Concrete Elements
Considering Strain Rate Effects under Repeated Loads

심종성* 문일환**
Sim, Jongsung Moon, Il-Hwan

요약

지진이나 충격과 같은 강한 동적반복하중을 받을 경우 철근콘크리트 부재의 거동을 예측하는 현재의 해석기법은 변형율속도의 영향을 고려하고 있지 않으며, 휨거동만을 이상화하고 있어 예측치와 실험치 사이에 커다란 오차를 수반하고 있다는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 변형율속도의 변화에 따른 부재의 휨강도 및 전단강도를 예측할 수 있는 기법과 부재거동의 구성요소인 휨변형과 전단변형을 몇개의 이력변수를 사용하여 이상화한 구조해석 모델을 접목함으로써 강한 동적반복하중에서도 실제와 거의 일치하는 구조거동을 예측할 수 있는 소프트웨어를 완성하였으며, 그를 이용한 비교결과는 비교적 만족스러웠다.

ABSTRACT

The current analytical techniques for R/C elements under severe dynamic repeated loads, like earthquake or impact, have two major problems; one is that the effects of strain rate are not considered and the other one is the current analytical model was developed based on flexural behavior only.

This study develops computer software that can idealize the flexural and shear behavior of R/C elements using several parameters and also can consider the effects of strain rate. The analytical results using the developed technique were compared with several experimental results and they were generally satisfied.

1. 서론

철근콘크리트(R/C)구조물이 지진이나 충격

과 같은 강한 동적반복하중을 받을 경우의 거동에 예측을 위한 현재의 해석기법은 많은 문제점을 내포하고 있는 것으로 알려져 있다. 대

* 정회원, 한양대학교 공학대학 목목공학과, 조교수

** 한양대학교 대학원 목목공학과, 석사과정

● 1990. 4. 30 접수, 본논문에 대한 토론을 1990. 9. 30까지 본 학회에 보내주시면 1990. 12월호에 그 결과를 게재해 드리겠습니다.

표적인 문제점으로는 변형율속도의 변화가 R/C구조의 거동에 미치는 영향을 고려하고 있지 않다는 점과 동적반복하중상태에서 R/C구조의 변위를 휨변위량만이 지배하는 것으로 보고 대부분의 해석모델이 휨해석에만 주안점을 두고 있다는 점이다.

지금까지 R/C구조의 비선형해석에서 무시되어 왔던 변형율속도는 실험결과에 의하면 정적하중상태는 $10^{-5}/\text{sec}$ 이고, 지진이나 충격하중상태의 경우는 각각 $10^{-2}/\text{sec}$ 및 $10^{-1}/\text{sec}$ 로 나타났다. 이러한 변형율속도의 변화에 대한 구조물체의 영향을 평가하기 위한 구조실험결과에 의하면 변형율속도가 정적하중상태에서 지진하중상태로 변화함에 따라 약 20%의 휨강도가 증가하는 것으로 나타났다[4]. 따라서 동적반복하중을 받는 R/C 부재의 비선형해석에 있어 변형율속도의 영향을 고려하여야만 한다는 것은 자명한 사실이다.

또한, R/C 부재의 이력거동을 예측하기 위한 현재까지의 해석모델은 휨변위량이 전체변위량을 지배한다는 가정하에 휨해석을 행하고 있으나, 실험결과에 의하면 지진과 같은 탄성한계를 벗어난 강한 동적하중을 받을 경우 R/C 부재의 변위량은 휨변위량 뿐 만 아니라 전단변위량 및 부재 연결부에서의 고정단회전량에 의해 지배됨이 많은 연구를 통해 밝혀졌다[3]. 특히 전단 이력거동은 강성과 강도저하가 심하게 나타나고 낮은 에너지발산능력을 갖는 특징에 의해 휨 이력거동과는 구별되며 하중의 반복이 계속되면 강성이 저하되는 경향때문에 전단거동의 특징이 전체거동의 특징을 지배하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 R/C 부재의 변형이 주로 전단변위량과 휨변위량으로 구성되어 있는 점을 감안 할 수 있는 이미 개발되었던 비선형해석모델[3]을 도입하고, 변형율속도의 변화에 의한 구조물의 거동변화를 고려 할 수 있는 해석모델[2, 4]에 접목시킴으로써 강한 동적반복하중을 받는 경우의 R/C 부재의 실제 거동과 좀 더 가까운 예측치를 얻을 수 있는

구조해석용 소프트웨어를 완성하였다.

2. 연구동향

2.1 변형율속도

지진과 같은 강한 동적하중을 받는 R/C부재의 비선형 동적응답을 해석적으로 예측하기 위한 모델은 단순모델(simple model), 절단모델(discrete model), 유한요소모델 및 layer 모델 등으로 나눌 수 있다. 이 중에서 layer 모델은 유한요소모델에 바탕을 두고 있으나 계산효과를 높이기 위해 단순화한 형태라고 할 수 있다. 이 모델은 입력자료로 부재와 단면의 기하학적 형상과 콘크리트 및 철근에 대한 응력-변형률 관계를 이용하는 것으로 절단모델보다는 정교하지만 유한요소모델보다는 다소 그 정확성이 떨어지는 것으로 알려지고 있다. 그러나 이 모델은 변형율속도의 영향을 고려 할 수 있다는 장점때문에 이 분야의 많은 연구에 이용되고 있다[2]. Layer 모델링 기법은 변형율속도를 고려 할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면 그 계산과정의 복잡성 때문에 통상적으로 사용하기에는 부적당한 면을 가지고 있다. 따라서 본 연구자는 이러한 점을 개선하기 위해 실용설계식을 제안한 바 있었으며, 그의 기본가정은 다음과 같다[4].

- (1) 하중을 받기전 평면은 하중이 작용한 후에도 평면을 유지한다.
- (2) 콘크리트의 최대압축변형은 0.003이다.
- (3) 콘크리트의 압축응력은 Whitney의 등가응력 사각형으로 대치 될 수 있다.
- (4) 콘크리트의 인장강도는 무시한다.
- (5) 철근은 탄소성거동을 한다.

상기 나열한 기본가정과 함께 변형율속도의 영향을 고려하기 위해 단면전체의 변형율속도의 절대치는 극한압축전단의 변형율속도와 같다고 가정하면, 변형율속도의 변화에 따른 R/C 부재의 휨강도 증가를 계산하기 위한 알고

리즘은 다음과 같이 제안될 수 있었다.

제 1 단계 : 중립축(c)를 가정한다.(그림 1 참조)

제 2 단계 : 철근응력을 구한다.

$$\text{압축응력} : f_c = 87,000(c-d')/c \leq f_c'$$

$$\text{인장응력} : f_s = f_y'$$

제 3 단계 : 철근응력에 대한 c값을 다음 식에 의하여 구한다.

$$a = (A_s f_s - A_s' f_c) / (0.85 f_c' b)$$

$$c = a / \beta_1$$

$$\text{여기서, } \beta_1 = 0.85 - [0.05(f_c' - 4,000) / 1,000]$$

$$\text{단, } 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$$

제 4 단계 : c값의 변화가 비교적 작을 때까지 c의 새로운 값을 가지고 제 2 단계로부터 반복계산을 행한다.

제 5 단계 : 위의 조건을 만족하는 변형율속도에 따른 휨강도(Mn')를 구한다.

$$Mn' = A_s f_y' (d-d') + 0.85 f_c' ab(a/2-d) \quad (1)$$

여기서, A_s는 인장철근의 단면적

A_s'는 압축철근의 단면적

d는 횡단면의 유효깊이

d'는 압축철근의 중심에서 횡단면의 극한압축선단까지의 거리

a는 콘크리트 압축응력을 표현한 등가사각블럭의 깊이

그리고, f_y'와 f_c'는 각각 변형율속도의 변화에 따라 변하는 철근의 항복강도 및 콘크리트의 압축강도이다.

$$f_y' = [-4.51 \times 10^{-6} f_y + 1.46 + (-9.20 \times 10^{-7} f_y + 0.0927) \log_{10} \dot{\epsilon}_c] \quad (2)$$

$$f_c' = \begin{cases} f_c' [1.48 + 0.160 \log_{10} \dot{\epsilon}_c + 0.0127 (\log_{10} \dot{\epsilon}_c)^2] & \text{for air-dried concrete} \\ f_c' [2.54 + 0.580 \log_{10} \dot{\epsilon}_c + 0.0543 (\log_{10} \dot{\epsilon}_c)^2] & \text{for saturated concrete} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_c$ 는 단면의 극한선단에서의 변형율속도

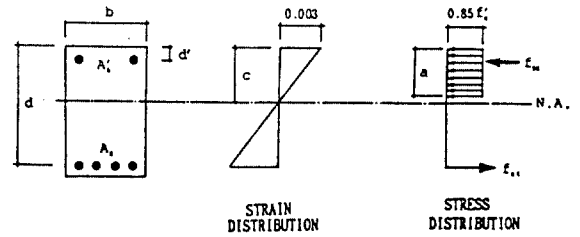


그림 1 Strain and Stress Distributions at Failure

위와 같은 변형율속도를 고려한 식(1), (2) 및 (3)에 의한 해석결과는 layer 모델에 의한 해석결과와 비교해 볼 때 유사함을 알 수 있었다 [4].

2. 2 Physical 모델

현재 사용되고 있는 대표적인 physical 모델은 single component 모델, multi component 모델, fiber 모델, multi spring 모델 및 비탄성이 분포된 one component 모델 등이 있다. 각각의 모델은 장, 단점을 가지고 있으며, 특히 single component 모델을 제외한 모델들은 막대한 계산시간을 필요로 하기 때문에 비경제적인 문제점을 가지고 있다고 할 수 있다. 또한 현재까지 제안된 모델들은 R/C부재의 전체 변위량을 휨변위량이 지배한다는 가정하에 제안된 모델이므로 실제거동과 이론적 예측치 간에는 다소 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위한 연구를 수행한 바 있고, 연구결과 R/C부재의 휨거동과 전단거동을 각각 이상화 시킬 수 있는 그림 2와 같은 physical 모델을 제안한 바 있었으며, 그 결과는 매우 만족스러웠다[3].

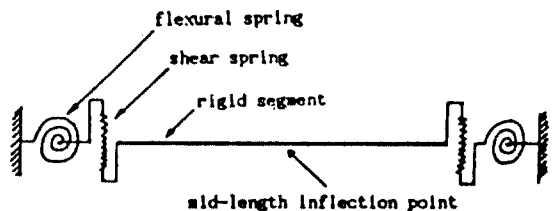


그림 2. 제안된 physical 모델

2. 3 Hysteresis Rule

동적하중을 받는 R/C부재의 거동을 예측하기 위해서는 앞서 언급된 physical 모델과 결합되어 적용될 hysteresis rule이 필요하며, 따라서 현재까지 많은 hysteretic 모델들이 제안되어 왔다. 이러한 hysteretic 모델들은 bilinear 모델을 시초로 정확성을 향상시키고자하는 많은 연구를 통해 curvilinear 모델 및 trilinear 모델을 근간으로 하여 제안되어 왔다. 그러나 bilinear 모델형태를 제외한 나머지 모델들은 많은 법칙과 막대한 계산시간을 요하게 되는 비경제적인 면을 가지고 있어, 현재의 추세는 curvilinear 나 trilinear 모델형을 지양하고 bilinear형인 수정된 Takeda 모델을 선호하고 있는 경향을 나타내고 있다. 그러나 현재까지 제안된 대부분의 모델들은 휨해석에만 주안점을 두고 있는 모델이므로 예측치와 실험치간에는 많은 차이를 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서는 휨과 전단을 이상화할 수 있는 이력변수 α , β , r , ζ 를 이용한 hysteresis rule을 제안 한 바 있으며, 여기서는 이미 제안된 hysteresis rule을 간단히 설명하고자 한다[3].

그림 2에서 소개된 physical 모델과 결합하였던 hysteresis rule은 skeleton curve, unloading curve, reloading curve, Baushinger 효과와 핀칭효과 그리고 small amplitude rule로 구성되었다. 본 연구에서는 앞서 언급되었듯이 trilinear 나 curvilinear skeleton curve가 정확성을 크게 향상시키지 못한다는 점에 착안하여 skelton curve의 설정을 bilinear curve로 채택하였다. 제안된 hysteresis rule에서는 우선 bilinear skeleton curve의 설정이 필요한데, 이때 탄성구역의 강성 K_i 의 결정은 정적해석결과에 의하여 결정되게 되며, 변위가 항복변위 X_y 를 넘는 소성구역의 강성 K_h 의 결정도 역시 실험치로부터 통계적인 방법에 의해 구하게 된다. Unloading curve를 결정하기 위한 이력변수 α 는 강성연화에 의한 초기강성저하를 고려하기 위한 변수로 그림 3에서 알 수 있듯

이 초기강성 K_i 에 의한 변위축(X축)상의 점까지의 거리인 Y_1 값과 강성연화에 의한 변위량의 비율 나타낸 변수이다. 이 변수는 0.0부터 1.0사이의 값을 가지며, 강성연화가 클수록 증가하게 된다. 이력변수 β 는 reloading skeleton curve의 기본형태를 결정하기 위한 변수로 에너지 손실이 없는 경우 선행한 cycle의 turning point를 향하게 되지만 실험결과에 의하면 여러가지 손실요인에 의해 그 이력곡선은 turning point보다 크거나 작은 곳을 향하게 된다. 이 변수는 그림 3에 나타낸 것과 같이 선행하는 cycle에서의 강성이 K_h 인 부분의 수평길이 Y_2 를 기준으로 결정하게 된다. β 값이 0.0에서 1.0사이에 있는 경우는 점 A와 점 B 사이에 존재하는 점을 향하게 되고, 1.0이상인 경우는 B점을 벗어나는 점을 향하게 된다. 이력변수 ζ 값은 그림 3에 나타낸 것과 같이 skeleton curve에서의 강성 K_h 를 기준으로한 상대적인 기울기를 나타낸다. ζ 값이 0.0인 경우는 X축과 동일하게 되고 1.0인 경우는 K_h 를 따르게 된다. 이력변수 r 값은 -1.0에서부터 1.0사이의 값을 가지며, 이것은 실제 이력경로가 β 값에 의해 결정되는 직선에서 어느정도 벗어나는 지를 정의한다. 양의 값 r 는 휨거동 특징인 Baushinger 효과를 표현하게 되고, 음의 r 값은 전단거동의 특징인 핀칭효과를 표현하게 된다. 완전한 cycle을 이루지 못하는 경우에는 small amplitude rule을 별도로 적용한다.

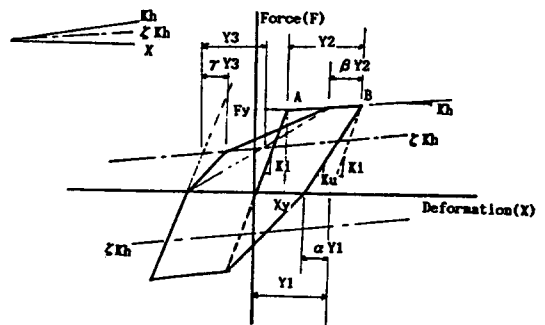


그림 3 Typical Flexural Hysteresis Curve

상기에 언급된 이력변수들의 결정은 휨거동과 전단거동의 경우 각각 다르게 적용되며 이 값은 실험데이터를 통계처리하여 구하였다. 전체적인 부재의 강성은 휨거동에서의 강성과 전단거동에서의 강성을 결합하여 얻게 된다.

3. 제안된 해석모델

본연구에서는 이미 이연구에 앞서 행하여졌던 변형률속도의 영향을 고려하기 위한 R/C 부재의 실용설계식과 휨 및 전단변위를 고려하기 위해 행하여졌던 physical 모델 및 hysteresis rule을 접목함으로써 변형률속도를 고려할 수 있는 새로운 hysteresis rule을 제안하였다.

본 연구에는 skeleton curve의 결정에 있어 기존에는 정적하중상태에서 해석적방법으로 결정하던 초기탄성강성 및 제2강성을 실제적인 동적하중상태의 변형률속도를 고려하여 결정하도록 함으로써 실측치와 예측치간의 차이를 더욱 줄였다. 제안된 해석모델에서는 변형률속도의 증가에 따른 휨 항복강도 및 항복변위의 증가를 고려하기 위해 2.1 절에서 언급되었던 공식(1), (2) 및 (3)을 이용하였다. 전단거동에 대한 항복강도 및 항복변위는 R/C 부재의 휨 항복시 전단항복도 동시에 발생하는 것으로 가정하여 문제를 해결하였다. 그리고 나머지 이력변수 즉, unloading curve를 결정하기 위한 변수 α , reloading curve를 결정하기 위한 이력변수 β , Baushinger 효과 및 핀칭 효과를 고려하기 위한 이력변수 γ 및 ζ , 그리고 small amplitude cycle의 결정방법은 앞서 제안하였던 해석모델, 즉, 2. 3 절의 hysteresis rule을 따르는 것으로 하였다.

그림 4는 본 연구에서 완성한 해석프로그램의 개관적인 흐름도를 나타낸 것이다. 본 연구에서 완성한 소프트웨어는 VAX 8700대형 컴퓨터에서 interactive run이 가능하도록 작성되어 데이터 입력시 각 단계의 에러를 그래픽터미널(Textronix 4012)을 이용하여 직접 확인

할 수 있도록 작성된 것이 특징이다. 작성된 구조해석 프로그램에서는 토목이나 건축구조에서 일반적으로 사용되는 사각단면, 원형단면, I형단면 그리고 T형단면 해석이 모두 가능하게 하였으며, 요소의 길이에 따른 영향도 고려할 수 있도록 하였다. 또한 하중재하속도 및 정적하중상태에서의 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도 및 탄성계수를 입력데이터로 사용하여 재료적 특성을 고려하도록 하였으며, 이러한 특성을 고려하여 bilinear skeleton curve가 결정되면 실험값으로부터 결정된 이력변수 $\alpha, \beta, \gamma, \zeta$ 에 의해 전체적인 hysteretic curve가 결정된다.

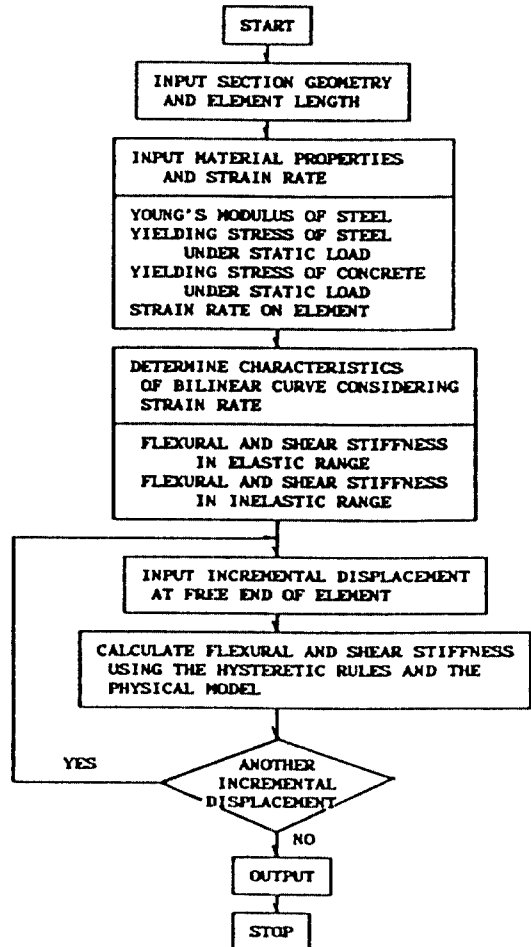
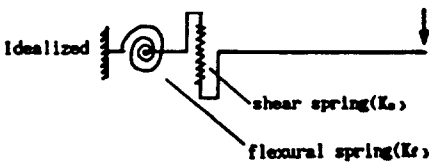
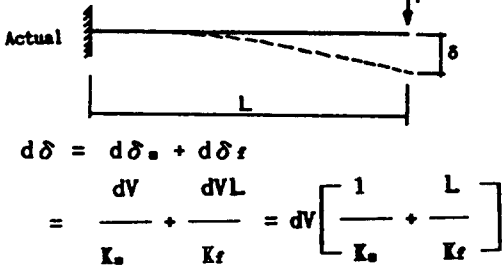


그림 4 구조해석 프로그램의 흐름도

4. 비교 및 고찰

본 연구에서 제안된 physical 모델은 그림 2와 같이 중앙에 inflection point가 존재하는 것으로 가정하였으며, 그 가정결과는 많은 연구자들에 의해 정확성 및 계산시간 감소에 따른 경제성을 크게 만족시키는 것으로 밝혀졌다. 따라서 반복하중을 받는 R/C 부재의 hysteric 거동을 예측하기 위한 강성 매트릭스의 유도는 그림 5에 나타낸 것과 같이 캔틸레버의 처짐량을 이용하여 구하고 있다[3].



$$dV = K_t d\delta$$

$$= \left[\frac{1}{\frac{1}{K_s} + \frac{L}{K_f}} \right] d\delta$$

그림 5 캔틸레버보의 강성 매트릭스

4.1 비교 DATA 선정

개발한 프로그램의 정확성을 확인하기 위해 임의의 하중재하속도를 가지는 Scribner 와 Wight[1]가 실험한 결과의 일부를 비교 data로 사용하였다. 채택된 실험 data의 제원은 표 1과 같다.

표 1 비교 Data 일람표

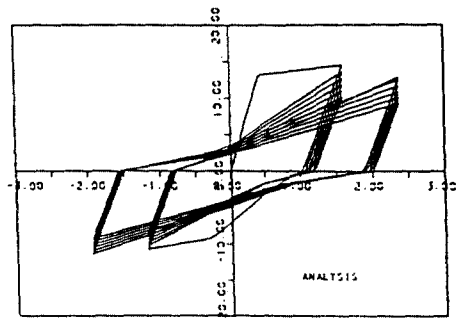
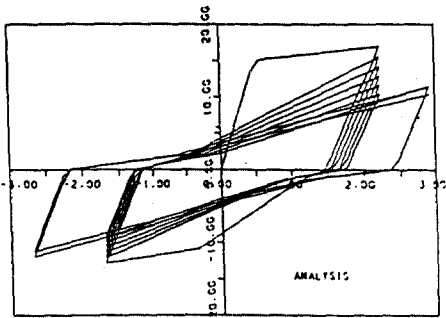
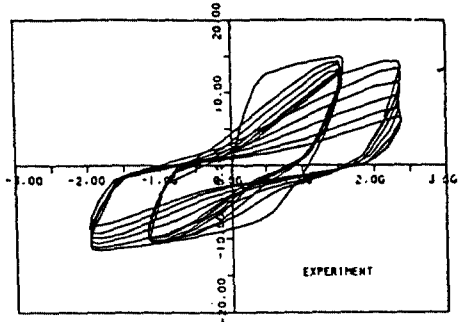
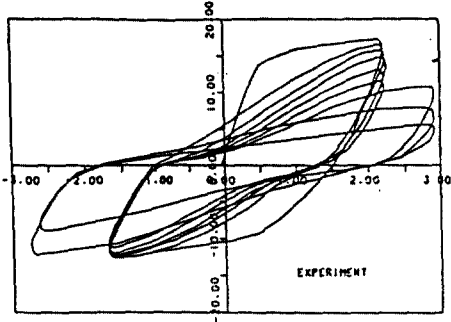
구분	CYCLE수	중방향 철근비 (As/bd)	횡방향 철근비 (Av/bd)	전단스팬비 (a/u)
SPC3	8	0.0127	0.0063	4.8
SPC5	12	0.0127	0.0063	3.6
SPC7	12	0.0163	0.0110	4.1
SPC9	7.5	0.0262	0.0073	5.0

4.2 실험결과 및 해석결과의 비교

그림 6(a)에서 (d)에는, 개발된 해석모델을 이용하여 생성된 이력거동과 실험결과에 의한 하중-변위 곡선을 비교, 도시하였다. 개발된 해석모델은 휨과 전단변위의 거동특성을 각각 이상화 시킬 수 있는 특징이 있어 load cycle 후반부에서의 부재거동을 재현시킬 수 있었으며, 해석모델에 의한 예측결과는 실험치와 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

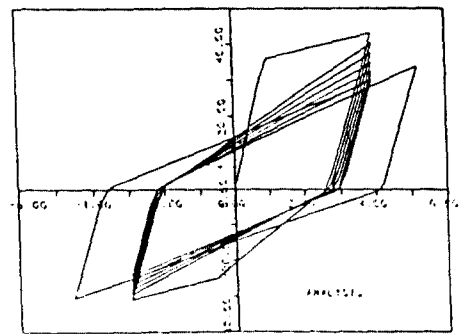
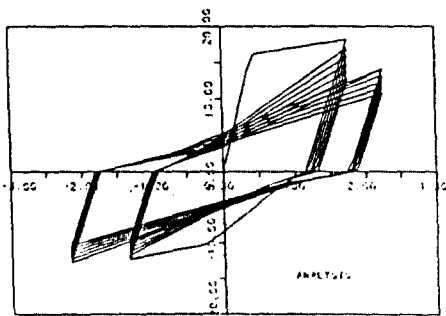
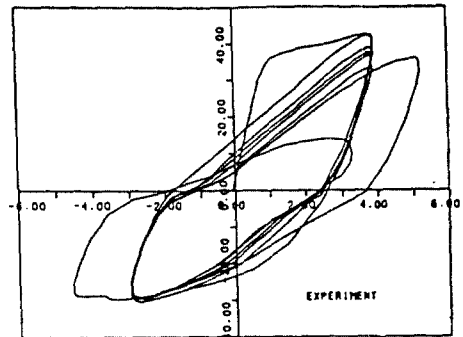
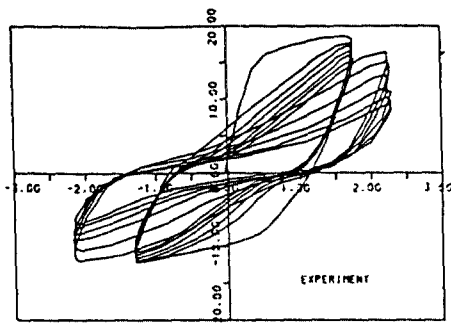
4.3 비교 및 고찰

실험결과에 따르면 콘크리트 보의 이력특성은 전단스팬비(a/d), 주철근비 그리고 횡보강철근비 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 단면 형상을 interactive run을 통하여 임의로 입력 할 수 있게 하였으며, 이를 사용하여 얻은 구조부재의 거동은 단면 형상이 어떠한 경우이든 간에 만족스럽게 재현 할 수 있는 예측결과를 나타내고 있다. 예를 들면, 철근비가 비교적 작은 그림 6(a) 및 6(b)의 경우는 철근비가 약 2배에 이르는 그림 6(d)에 비해 최대 및 최소변위가 약 0.5 배를 나타냄으로써 철근비의 변화에 따라 예측된 이력곡선이 변화됨을 알 수 있고, 전단스팬비(a/d)가 비교적 작은 그림 6(b)의 경우는 부재거동에 철근이 미치는 영향이 작을 것으로 예측되며, 그 결과도 약간의 편차현상을 나타냄으로써 예측결과의 정확성을 입증하고 있다. 또한 전단스팬비(a/d)가 비교적 큰 그림 6



(a) SPC3

(b) SPC5



(c) SPC7

(d) SPC9

그림 6. 실험 및 해석에 의한 하중-변위 곡선의 비교(kips-inches)

(d)의 경우는 부재거동에 철근이 미치는 영향이 클 것으로 여겨지며, 그 결과 역시 bowing된 형태를 나타내며, 횡보강 철근이 비교적 많은 그림 6(c)의 이력거동은 중방향 철근량이 그림 6(d)보다 적음에도 불구하고 안정된 형태를 보이고 있어 이론적인 예측결과가 실험결과에 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

지진이나 충격과 같은 강한동적반복하중을 받을 경우 철근콘크리트 부재의 거동을 예측하는 현재의 기법은 많은 문제점을 내포하고 있는 것으로 알려지고 있다. 대표적인 문제점으로는 하중재하속도가 정적상태에서 동적상태로 변화함에 따라 구조거동에 미치는 변형률속도의 변화의 영향을 고려하고 있지 않다는 점과 현재까지의 대부분의 구조거동에 관한 예측모델은 휨거동만을 이상화하고 있으나, 실험결과에 따르면 구조물의 변형량은 휨 변형량, 전단변형량 그리고 고정단에서의 회전량으로 구성되어 있어 예측치와 실험치가 큰 차이를 나타내고 있다는 점이다.

따라서, 본 연구에서는 변형률속도의 변화에 따른 부재의 휨강도 및 전단강도를 예측할 수 있는 기법과 부재거동의 구성요소인 휨변형과 전단변형을 몇개의 이력변수를 사용하여 이상화한 구조해석 모델을 접목함으로써 강한동적 반복하중하에서도 실제와 거의 일치하는 구조거동을 예측할 수 있는 소프트웨어를 완성하였으며, 이를 이용한 비교결과는 비교적 만족스러웠다.

본 연구에서는 강한 동적반복하중을 받는 R/C부재의 거동을 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하는 것으로 연구범위를 제한하였으나, 앞으로 이 기법을 연장하여 구조체의 동적응답을 예측할 수 있도록 연구범위를 확장하고자 하며, 뿐만 아니라 본 연구에서는 일반적으로 실험에서 사용하는 변위제어식 방법에 의해 미리 정해진 최대 및 최소변위 그리고

미리 정해진 반복횟수 등을 포함하는 동적하중만을 대상으로 하였으나 앞으로는 지진하중 또는 충격하중 등과 같이 임의의 형태를 갖는 동적하중을 연구대상으로 하고자 한다. 이와 같은 연구결과는 현재 국내, 외에서 사용하고 있는 R/C구조의 내진 설계상의 문제점을 개선하는데 기본자료로 이용될 수 있을 것이다.

단위환산

본 논문에서 사용한 단위는 모두 U. S. C. S 단위이므로 국내에서 사용하기 위해서는 다음과 같이 환산하여야 한다.

$$1\text{kips} = 43634.88\text{kg}$$

$$1\text{kpsi} = 70.31\text{ kg/cm}^2$$

$$1\text{inches} = 2.54\text{cm} = 25.40\text{mm}$$

감사의 글

본연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제 지원에 의하여 진행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Scribner, C. F. and Wight, J. K., "Delaying Shear Strength Decay in R/C Flexural Members under Large Load Reversals", Report No. UMEC 76-R2, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1978.
2. 심종성, "변형률속도를 고려한 철근콘크리트 부재 거동예측을 위한 개선된 해석 모델", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제2호, 1989, 6. pp. 23-29.
3. 심종성, "휨 및 전단 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비선형해석 모델", 콘크리트학회지, 제1권, 제1호, 1989, 9, pp. 115-124.
4. 심종성, "변형률속도변화에 대한 철근콘크리트 부재 설계인자의 민감성 연구", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제4호, 1989, 12, pp. 9-13.