

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

0 심 종 성 * 문 일 환 **
Sim, Jongsung * Moon, Il-Hwan

ABSTRACT

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

Thus, this study develops a 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 analytical technique were compared with several experimental results and were generally satisfied.

1. 서론

철근콘크리트(R/C) 구조물이 지진이나 충격과 같은 강한 동적반복하중을 받을 경우의 거동예측을 위한 현재의 해석기법은 크게 두가지 문제점을 내포하고 있는 것으로 알려지고 있다. 첫번째 문제점은 변형율속도의 변화가 R/C 구조의 거동에 미치는 영향을 고려하고 있지 않은 점이며, 두번째 문제점은 동적반복하중상태에서 R/C 구조의 변위가 휨변위량만으로 구성되는 것으로 보고 대부분의 해석모델이 휨거동의 이상화에만 주안점을 두고 있다는 점이다.

지금까지 R/C 구조의 비선형해석에서 무시되어 왔던 변형율속도는 실험결과에 의하면 정적하중상태는 10^{-5} /sec이고, 지진이나 충격하중상태의 경우는 각각 10^{-2} /sec 및 10^{-1} /sec이며, 이러한 변형율속도의 변화에 대한 구조물의 영향을 평가하기 위한 구조실험결과에 의하면 하중재하속도가 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 전단 변위량 및 부재 연결부에서의 고정단회전량에 의해 지배

됨이 많은 연구를 통해 밝혀졌다[3]. 특히 전단 이력거동은 하중의 반복이 계속되면 강성이 저하되는 경향때문에 전단거동의 특징이 전체거동의 특징을 지배하게 되므로 휨거동에 주안점을 두고 있는 비선형 해석모델은 반드시 수정되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 R/C 부재의 변형이 주로 전단 변위량과 휨변위량으로 구성되어 있는 점을 감안 할 수 있는 이미 개발되었던 비선형해석모델을 도입하고, 변형율속도의 변화에 의한 구조물의 거동변화를 고려 할 수 있는 해석모델에 집중시킴으로써 강한 동적반복하중을 받는 경우의 R/C 부재의 실제거동과 좀 더 가까운 예측치를 얻을 수 있는 구조해석용 소프트웨어를 완성하였다.

2. 기존의 연구결과

2.1 변형율속도

변형율속도의 변화가 구조거동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 R/C 부재의 layer 모델을 제안한 바 있으며, 그를 이용한 R/C 부재 거동의 예측결과는 만족스러웠다[2]. 그러나 layer 모델링 기법은 변형율속도를 고려 할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면 그 계산과정의 복잡성때문에 통상적으로 사용하기에는 부적당한 면을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 개선하기 위해 ACI 318 Committee 에서 제안한 공칭 휨강도를 구하기 위한 실용설계식을 제안한 바 있었다[4]. 제안된 실용설계식에서는 ACI 의 기본가정과 함께 변형율속도의 영향을 고려하기 위해 단면전체의 변형율속도의 절대치는 극한압축전단의 변형율속도와 같다

* 정회원, 한양대학교 공학대학 토목공학과 조교수
** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

고 가정하였고, 따라서 변형률속도의 변화에 따른 R/C 부재의 증가된 휨강도(Mn')를 계산 하기 위한 과정은 다음과 같다.

- 제 1 단계 : 중립축(c)를 가정한다.(그림 1 참조)
 제 2 단계 : 철근응력을 구한다.

$$\begin{aligned} \text{압축응력} : f_{sc} &= 87,000 (c - d') / c \leq f_y' \\ \text{인장응력} : f_{st} &= f_y' \end{aligned}$$

- 제 3 단계 : 철근응력에 대한 c 값을 다음 식에 의하여 구한다.

$$\begin{aligned} a &= (A_s f_{st} - A_s' f_{sc}) / (0.85 f_c'' b) \\ c &= a / \beta_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \beta_1 &= 0.85 - [0.05(f_c'' - 4,000) / 1,000] \\ 0.65 &\leq \beta_1 \leq 0.85 \end{aligned}$$

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

- 제 5 단계 : 위의 조건을 만족하면 변형률속도를 고려한 R/C 부재의 휨강도(Mn')를 구한다.

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

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

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

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

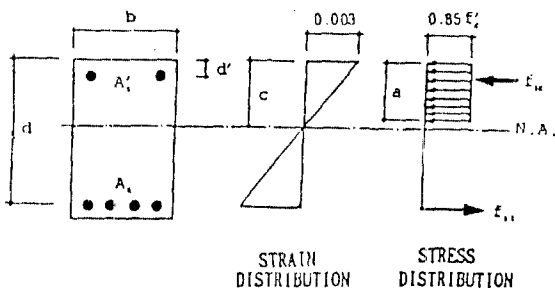


그림 1 Strain and Stress Distributions at Failure

변형률속도를 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

현재까지 제안된 모델들은 R/C부재의 전체 변위량을 휨변위량이 지배한다는 가정하에 제안된 모델이므로 실재거동과 이론적 예측치간에는 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 제안 한 바 있었으며, 그 결과는 매우 만족스러웠다[3].

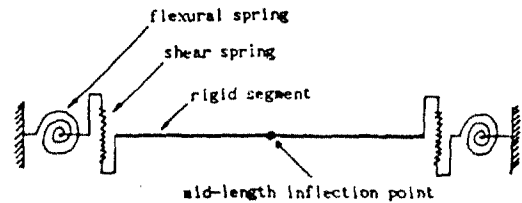


그림 2 Physical Model

2.3 Hysteresis Rule

동적하중을 받는 R/C 부재의 거동을 예측하기 위해서는 앞서 언급된 physical 모델과 결합되어 적용될 hysteresis rule이 필요하며, 따라서 본 연구에서는 휨과 전단을 이상화 할 수 있는 이력변수 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 를 이용한 hysteresis rule을 제안 한 바 있다[3]. 그림 2에서 소개된 physical 모델과 결합하였던 hysteresis rule은 skeleton curve, unloading curve, reloading curve, Baushinger 효과, 핀칭효과 그리고 small amplitude rule로 구성되었다. 제안되었던 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 3의 $Y1$ 값과 강성연화에 의한 변위량의 비를 나타낸 변수이다. 이력변수 β 는 reloading skeleton curve의 기본형태를 결정하기 위한 변수로 그림 3의 $Y2$ 를 기준으로 결정하게 된다. 이력변수 δ 값은 Baushinger

효과 및 편칭효과를 고려하기 위한 변수로 skeleton curve에서의 강성 K_h 를 기준으로한 상대적인 기울기를 나타내며, 마지막으로 이력변수 γ 값은 양의 값일 경우 휨거동 특징인 Baushinger 효과를 표현하게 되고, 음의 γ 값일 경우는 전단거동의 특징인 편칭효과를 표현하게 된다. 완전한 cycle을 이루지 못하는 경우에는 small amplitude rule을 별도로 적용한다.

성강성 및 제 2강성을 실제 작용한 동적하중상태의 변형 율속도를 고려하여 결정하였다. 즉, 변형율속도의 증가에 따른 휨 항복강도 및 항복변위는 2.1 절에서 언급되었던 공식 (1), (2) 및 (3)을 이용하였으며, 전단거동에 대한 항복강도 및 항복변위는 R/C 부재의 휨 항복시 전단항복도 동시에 발생하는 것으로 가정하여 문제를 해결

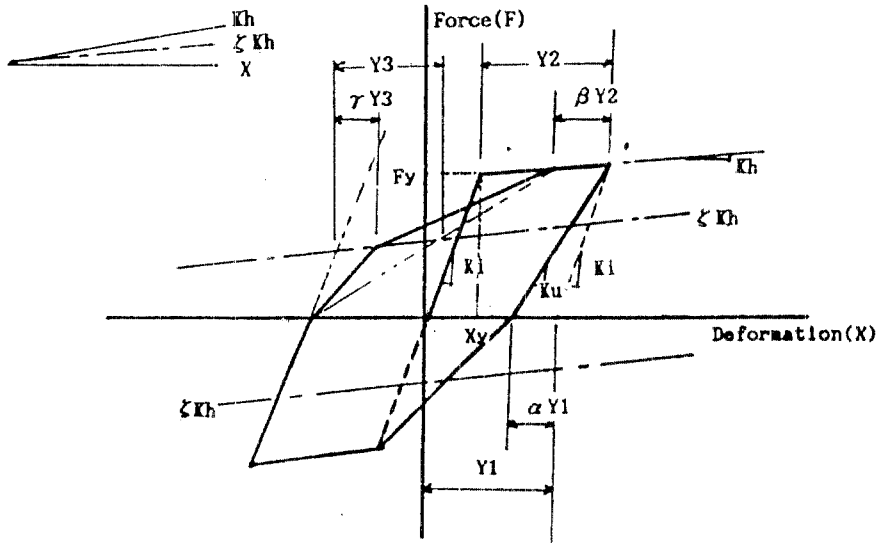


그림 3 Typical Flexural Hysteresis Curve

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

본 연구에서는 이미 이 연구에 앞서 행하여 졌던 변형 율속도의 영향을 고려하기 위한 R/C 부재의 실용설계식과 휨 및 전단변위를 고려하기 위해 행하여 졌던 physical 모델 및 hysteresis rule을 접목함으로써 변형율속도를 고려 할 수 있는 새로운 hysteresis rule을 제안하였다.

본 연구에서는 skeleton curve의 결정에 있어 기존에는 정적하중상태에서 해석적 방법으로 결정하던 초기탄

하였다. 그리고 나머지 이력변수 α , β , γ 및 ξ 값의 결정은 2.3절의 hysteresis rule을 따르는 것으로 하였다.

그림 4는 본 연구에서 완성한 해석프로그램의 개발적인 흐름도를 나타낸 것이다. 작성된 구조해석 프로그램에서는 토목이나 건축구조에서 일반적으로 사용되는 사각단면, 원형단면, I 형단면 그리고 T 형단면 해석이 모두 가능하게 하였으며, 또한 하중재하속도 및 정적하중상태에서의 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도 및 탄성계수를 입력데이터로 사용하여 변형율속도의 변화에 따른 재료적 특성을 고려하도록 하였으며, 이러한 특성을 고려하여 bilinear skeleton curve가 결정되면 실험값으로부터 결정된 이력변수 α , β , γ , ξ 에 의해 전체적인 hysteretic curve가 결정된다.

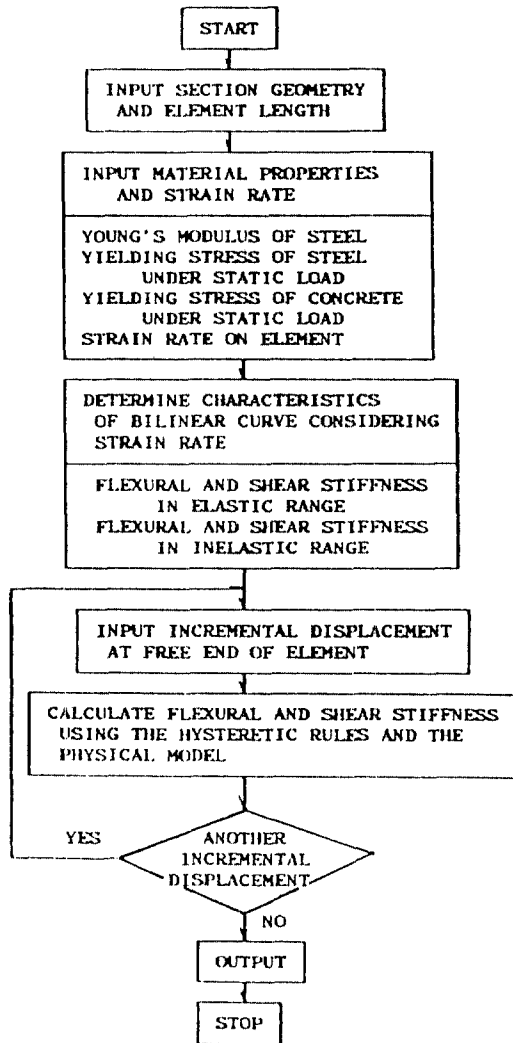
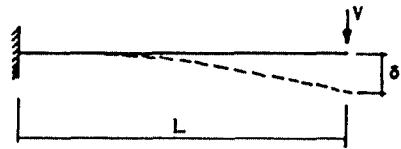


그림 4 구조해석 프로그램의 흐름도

4. 비교 및 고찰

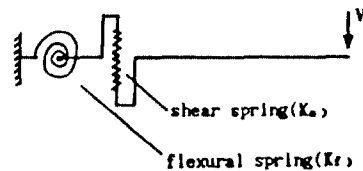
제안된 physical 모델은 그림 2과 같이 중앙에 inflection point가 존재하는 것으로 가정하였으며, 따라서 반복하중을 받는 R/C 부재의 hysteretic 거동을 예측하기 위한 강성 매트릭스의 유도는 그림 5에 나타낸 것과 같이 캔틸레버의 처짐량을 이용하여 구하고 있다[3].



Actual

$$d\delta = d\delta_s + d\delta_r$$

$$= \frac{dV}{K_s} + \frac{dVL}{K_r} = dV \left[\frac{1}{K_s} + \frac{L}{K_r} \right]$$



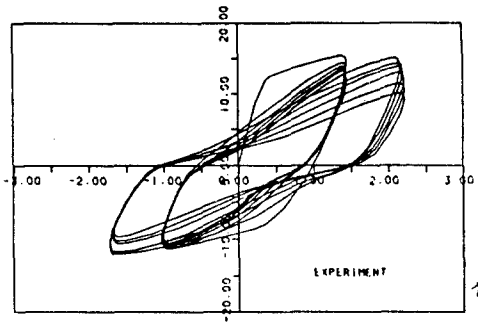
Idealized

$$dV = K_t d\delta$$

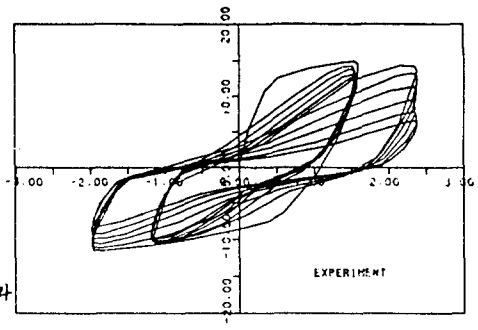
$$= \left[\frac{1}{\frac{1}{K_s} + \frac{L}{K_r}} \right] d\delta$$

그림 5 캔틸레버의 강성 매트릭스

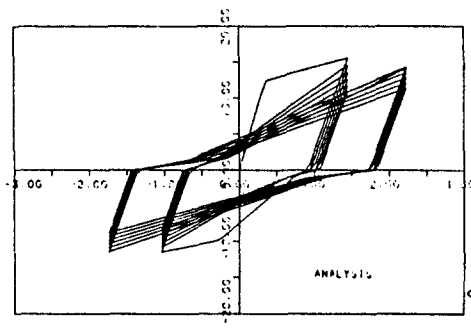
그림 6은 Wight와 Scribner[1]에 의한 임의의 하중 재하속도를 적용한 실험결과를 대상으로 본 연구에서 제안한 해석모델을 적용한 대표적인 결과의 한 예이다. 그림 6(a),(b)의 실험 및 이론적 해석결과는 전단스팬비 (a/d)가 3.6인 경우를 나타내며, (c)와 (d)는 a/d가 5.0일때의 결과를 나타낸다. 그림 6의 결과에서, 제안된 해석기법은 임의의 하중재하속도하에서도 예측결과와 실험치는 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.



실험 결과

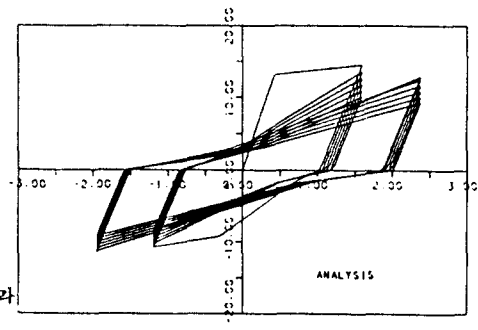


EXPERIMENT



ANALYSIS

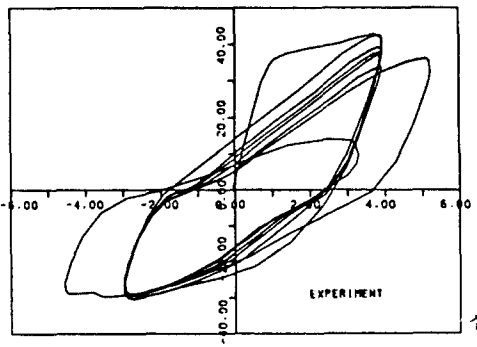
이론 계산



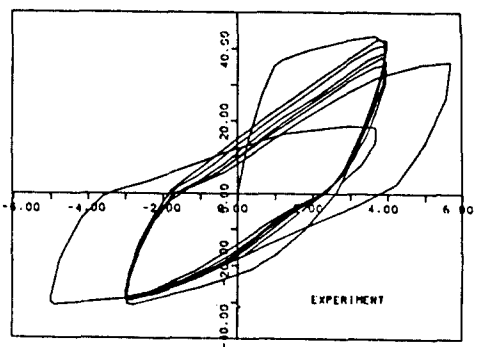
ANALYSIS

(a)

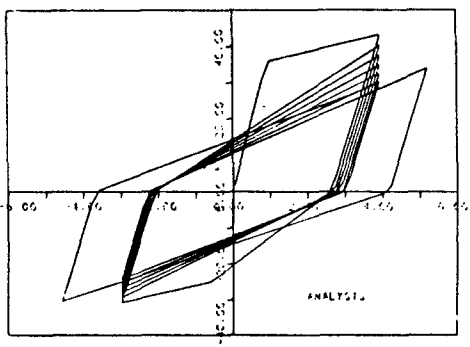
(b)



실험 결과

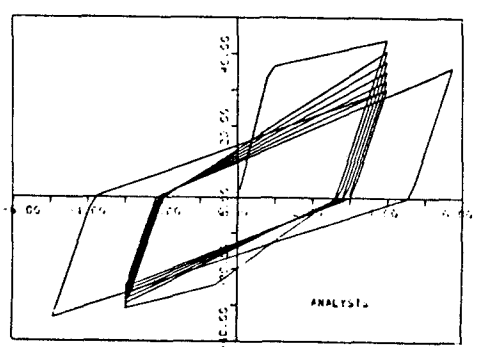


EXPERIMENT



ANALYSIS

이론 계산



ANALYSIS

(c)

(d)

그림 6 하중-변위 관계의 비교

5. 결론

본 연구에서는 변형율속도의 변화에 따른 부재의 휨 강도 및 전단강도를 예측 할 수 있는 기법과 부재거동의 구성요소인 휨변형과 전단변형을 몇개의 이력변수를 사용하여 이상화한 구조해석 모델을 접목함으로써 강한동적반복하중하에서도 실제와 거의 일치하는 구조거동을 예측 할 수 있는 소프트웨어를 완성하였으며, 이를 이용한 비교결과는 비교적 만족스러웠다.

본 연구에서는 강한 동적반복하중을 받는 R/C 부재의 거동을 예측 할 수 있는 해석모델을 개발하는 것으로 연구범위를 제한하였으나, 앞으로 이 기법을 연장하여 구조체의 동적응답을 예측 할 수 있도록 연구범위를 확장 하고져 하며, 뿐 만 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 하고져 한다. 이와 같은 연구결과는 현재 국내, 외에서 사용하고 있는 R/C 구조의 내진 설계상의 문제점을 개선하는데 기본자료로 이용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제 지원에 의하여 진행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

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. 심중성, "변형율속도를 고려한 철근콘크리트 부재 거동예측을 위한 개선된 해석모델", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제2호, 1989, 6, PP.23-29.
3. 심중성, "휨 및 전단 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비선형해석 모델", 콘크리트학회지, 제1권, 제1호, 1989, 9, PP.115-124.
4. 심중성, "변형율속도변화에 대한 철근콘크리트부재 설계인자의민감성 연구", 대한토목학회 논문집, 제9권, 제4호, 1989, 12, PP.9-13.