

동적반복하중을 받는 R/C 부재의 해석모델에 관한 최근 연구 동향

심 증 성*

1. 서언

지진이나 충격과 같은 강한 동적반복하중을 받는 철근콘크리트(R/C) 구조물은 초기에는 탄성 응답을 나타내지만, 하중이 반복되면 부재에 균열이 발생하여 강성이 크게 저하되고 전단변위가 급격히 증가되어, 결국 구조물은 탄-소성 변형을 일으키게 된다. 이러한 탄-소성변형은 비선형의 형태로 나타나므로 구조물의 동적 거동을 정확히 예측하고, 그에 따라 설계를 하기 위해서는 구조물의 동적 비선형에 관한 연구가 반드시 수반되어야 하며, 이러한 견지에서 이 분야의 실험적 및 이론적 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지의 철근콘크리트(R/C)부재의이력거동을 예측하기 위한 이론적 연구는 대부분이 휨 변위량이 전체 변위량을 지배한다는 가정하에 휨 해석을 행하고 있다. 그러나 지진과 같은 탄성한계를 벗어난 강한 동적반복하중을 받는 경우 철근 콘크리트 부재의 변위량은 휨 변위량뿐만 아니라 전단 변위량 및 부재연결부에서의 회전변위량에 의해 지배됨이 많은 연구를 통해 밝혀졌다[1,5-7, 11, 15, 18, 19]. 전단이력거동은 강성과 강도 저하가 심하게 나타나고 낮은 에너지 발산능력을 갖는 특징에 의해 휨 이력거동과는 구별되며 반복하중이 계속되면 강성이 저하되는 경향때문에 전단변형이

R/C 부재의 거동을 지배하게된다[6, 7]. 이러한 부재 거동의 특징에 건주어볼 때 현재 사용되고 있는 해석 모델을 이용하여 동적응답을 예측하고, 해석하여 설계된 기존의 R/C 부재는 강한 동적하중을 받을 경우 해석적으로는 전혀 예측치 못하게 되는 결과를 초래하게 된다.

2. 실험결과

반복하중을 받는 R/C 부재의 비선형거동을 해석적 기법으로 정확하게 예측하기 위해서는 부재거동에 대한 정확한 hysteresis모델이 개발 되어야하며, 이런 관점에서 R/C 거동을 정확히 파악하기 위한 실험적 연구도 매우 활발히 진행되고 있다 [3, 6, 7, 15]. 최근 행하여졌던 실험적 연구결과에 의하면 R/C부재의 총 변위량은 부재의 휨 변위, 전단 변위 그리고 부재 연결부의 고정단 회전 변위량으로 구분되고 있다[6, 7]. 이들의 상대적인 양은 부재의 형상, 크기 또는 그들을 구성하고 있는 재료 구성비율에 따라 다르며 반복하중을 받는 철근콘크리트부재의 거동은 초기에는 휨 변위량보다는 오히려 전단 변위량에 많은 영향을 받는 것으로 나타나고 하중반복이 계속됨에 따라 마지막 단계에서는 고정단 변위량의 영향이 큰 것으로 나타나고 있으나 현재 사용되고 있는 대부분의 R/C부재의 해석 모델은 이와 같은 현상을 고려하지 않고 있는데 그 문제가 있다[13].

* 정희원, 한양대학교, 토목공학과 조교수, 공학박사

3. 해석모델

철근콘크리트 구조물에 대한 비선형 동적 응답을 해석적으로 예측하기 위하여서는 우선 부재의 해석 모델이 필요하다. 반복하중을 받는 R/C부재의 거동 예측을 위한 해석 모델은 부재를 이상화시킨 physical model과 hysteresis rule의 결합 형태로 이루어진다[4, 9, 12-14, 16-19]. 본 논고에서는 현재 널리사용되고 있는 physical model과 hysteresis rule의 형태를 소개하고 이를 모델에서의 문제점을 언급하고자 한다.

3.1 Physical 모델

현재 R/C부재의 휨거동을 이상화하기 위하여 사용되고있는 대표적인 physical 모델은 그림1에서 도시된 바와같이 single component 모델, multi-component 모델, fiber 모델, multiple spring 모델과 비탄성이 분포된 single component 모델 등이 있다.

Single component 모델은 비선형성을 표현하는 스프링이 양단에 달린 탄성부재로 구성된다. Giberson 은 부재의 비탄성 변형을 모델화하는 2개의 휨 스프링이 양단에 부착된 single element 모델을 사용했으며[19], 또 다른 모델 형태는 Clough와 Benuska에 의해 제안된 dual component 모델인데 이 모델은 elasto-perfectly plastic 부재와 평행하게 놓인 탄성부재로 구성된다[4]. Dual component 모델은 단지 bilinear 거동만을 표현하고 강성 저하를 표현하지 못하기 때문에 R/C 부재 해석에 적합하지 않다.

Fiber 모델의 경우는 단면에서 철근과 콘크리트 모멘트-곡률 관계가 결정되면 부재 길이에 따라 적분하는 기법을 도입하여 부재 강성을 결정한다[8]. 따라서 강성 행렬을 구하는데 많은 계산시간이 소비되고 비용이 많이 드는 비경제적인 모델이다.

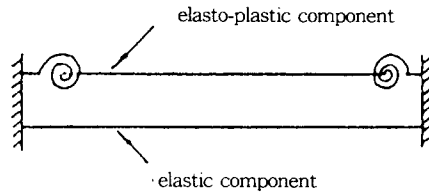
One component 모델은 다른 모델에 비해서 고정 단회전, 강도 저하, pinch action 등과 같은 비선형 특성에 대한 추가적인 계산이나 기억용량이 없이도 쉽게 모델에 고려할 수 있는 잇점이 있다. Single component나 parallel component 모델에서 소성힌

지는 단지 부재의 양단부에 집중하여 형성된다고 가정하고 있다. 그러나 큰 변형이 생길때는 소성힌지의 길이를 더 이상 무시할 수 없으며 게다가 강성의 특징은 탄성역에서도 길이에따라 변하므로 이것을 표현하기 위해 비탄성이 분포된 개선된 모델도 제시되었다[9].

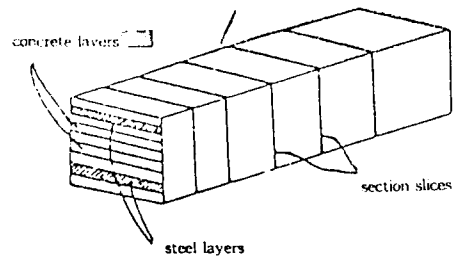
Takayanagi와 Schnobrich는 single component 모델을 확장하여 wall 부재 해석을 위한 multiple



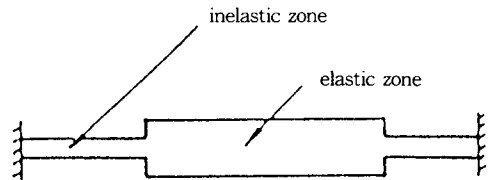
(a) Single Component Model



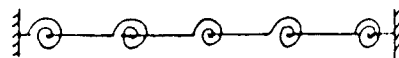
(b) Multiple-Component Model



(c) Fiber Model



(d) Single Component Model with Distributed Inelasticities



(e) Multiple Spring Model

그림1. Physical Models of Flexural Behavior

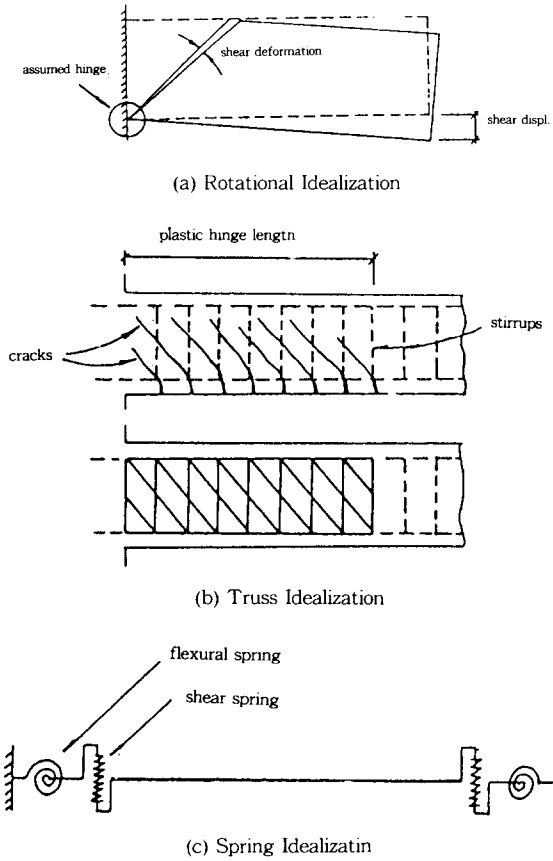


그림2. Physical Models of Shear Behavior

spring 모델을 제안하였다[17]. 제안된 모델에서는 부재가 축을 따라 몇 개의 스프링으로 연결된 부요소(segment)로 분할된다. 충분하게 많은 수의 부요소를 가진 이 모델은 반복하중이나 동적하중이 작용할 때 부재의 강성 행렬을 계산하기가 다른 모델보다 수월하지만 계산 시간이나 기억 용량면에서는 비경제적이다. 또한 일반적으로 휨 부재의 거동을 나타낼 수는 있으나 축 방향력의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

R/C부재의 전단거동을 이상화한 physical 모델은 그림2에 도시된 바와같이 회전체모델, truss모델, 그리고 spring 모델을 대표적인 것으로 들 수 있다. 회전체모델은 Kustu와 Bouwkamp에 의해 제안되었으나 그 범위가 deep beam에만 제한되어 있다 [11]. Truss모델은 보의 소성힌지 부분에서 발생하는 균열의 양상과 횡보강철근의 배열을 이상화

함으로써 보의 전단거동을 예측하는 기법인데 많은 계산을 요구하므로 현재에는 거의 사용되고 있지 않다. 따라서 현대의 추세는 보와 기둥의 접합부에 길이가 없는 휨 및 전단 스프링을 두어 각기 다른 hysteretic rule을 적용하는 spring모델을 선호하는 경향이 있다.

3.2 Hysteretic Rules

Hysteretic curve는 구조 재료나 구조형식 등에 따라 변화하는 것으로, 각각에 대해 단순 모델화를 행하여 동적 해석을 행하는 것이 최근의 연구동향이다. 이러한 hysteretic model은 bilinear model로부터 시작되어 예측치와 실제거동 간의 오차를 줄이기 위한 많은 연구를 통해 기본 모델이 수정되어 trilinear model과 Ramberg-Osgood model을 근간으로 하는 많은 모델이 제안되었다[13].

그림3에서 (a)의 bilinear 모델은 국부좌굴이나 구조의 바깥면에서의 좌굴발생이 없는 경우의 철골 순골조 등에 나타나는 가장 기본적인 형태이다. 그림(b)는 철골 순골조에 적용되는 형태로 철골의 대표적인 성질인 Baushinger 효과 등이 고려된 이력곡선이다. 그러나 이 모델은 곡선을 사용하고 있어서 많은 계산을 요구하는 단점이 있다. 그림(c)와 (d)는 휨 파괴가 일어난 철근콘크리트(R/C) 골조 등에 나타나는 것으로 강성이 변위진폭과 함께 저하되는 형식이다[4]. 그림(e)는 Takeda에 의하여 제안된 형태로서 횡보강이 있는 R/C 골조의 이력형태를 표현하는데 사용되어 졌다[18]. 그림(f)는 전단파괴가 발생한 R/C 골조 등에 적용되었으나 역시 곡선형태를 사용하고 있어 계산에 많은 시간이 요구된다.

이와같은 기본적인 hysteretic rule을 사용하여 많은 연구자들은 제각기 다른 형태의 모델을 제안하고 있다. 예를들면, Banon등은 전단과 slippage를 고려하는 hysteretic model을 bilinear envelope를 사용하여 제안하였다[2]. 그는 Unloading될때의 강성을 탄성강성과 같다고 보았으며 편칭강성은 변형경화강성의 약50%라고 가정하였고 강도저하를 고려하는 α 라는 변수를 제시하였다.

Roufaiel과 Meyer는 편칭(pinching)의 정도가

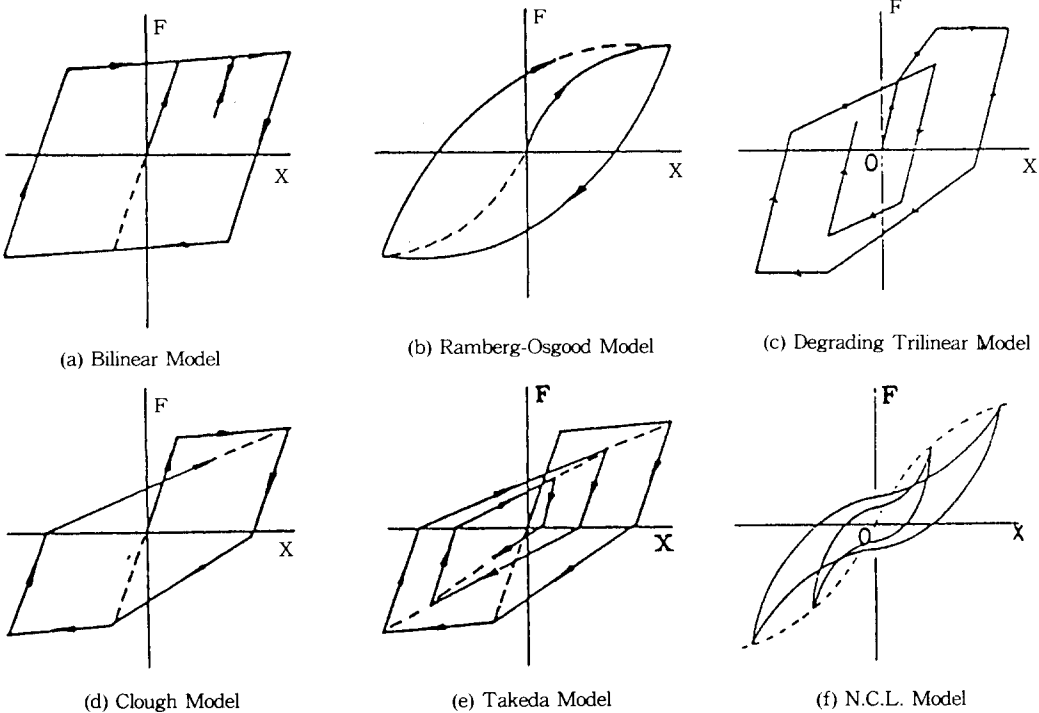


그림3. Hysteresis Models

전단스팬과 유효길이의 비(a/d)에 따라서 변한다고 하였으며[12] Ozecebe와 Saatcioglu는 reloading 될때의 핀칭강성이 주인장 응력이 $0.33 f_c M_{pa}(4.0 f_c psi)$ 일때 균열하중이 발생한다고 단순화 하였다. 그러나 이와같은 현재까지 제안된 대부분의 hysteretic rule은 휨, 전단, 그리고 고정단 변위량이 갖고있는 각각의 거동특성을 별도로 고려함없이 획일적으로 휨 거동특성의 이상화에만 주안점을 두고 있다는데 문제점이 있다.

또한 일본의 방재연구소의 연구에서도 알 수 있듯이 반복되는 동적수평력을 받는 경우 R/C 구조물의 이력곡선은 연직력과 수평력의 비에 따라 정구배의 bilinear형과 부구배의 bilinear곡선으로 나타나게 되며, 일반적으로 구조물의 파괴는 부구배를 갖는 구조물의 동적하중을 받게되면 한 쪽으로 편중되어 파괴에 도달하는 경우가 많다[20].

이와 같은 R/C 구조물의 이력곡선을 해석에 의해 구하는 경우 정해에 가까운 유한요소법에 의해 단면의 절편화를 통한 응력-변위 관계와 평면유지

의 가정 등을 이용해서 하중-변위 관계를 구하는 방법도 있으나, 이것은 막대한 계산량을 요하게되어 구조물의 거대와 추세에 볼 때 R/C 구조물의 경우, 전단거동의 대표적인 특성인 핀칭현상과, 휨거동의 특징인 변형 경화를 고려한 수정된 bilinear 형의 이력곡선이 가장 적합한 것으로 나타났으며, 그 결과 현재 이 분야의 추세는 경제성을 고려하여 curvilinear 모델을 지양하고 일반적으로 Takeda 모델을 수정한 형태를 선호하고 있는 경향이다[12, 16, 19].

참 고 문 헌

- Ataly, M.B. and Penzien, J., "The Seismic Behavior of Critical Regions Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment, Shear and Force," Report No. UCB/EERC-75/12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkly, Dev. 1975.
- Banon, H., Biggs, J.M. and Irvine, M.M., "Seismic

- Damage in Reinforced Concrete Frames”, J. of Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST9, Sep. 1981, pp. 1713–1729
3. Celebi, M. and Penzien, J., “Experimental Investigation into the Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components As Influenced by Moment and Shear”, Report No. UCB/EERC–73/04, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkly, Jan. 1973.
 4. Clough, R.W., Benuska, K.L. and Wilson, E.L., “Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings”, Proceedings of Third World Conference of Earthquake Engineering, Auckland and Wellington, New Zealand, Jan. 1965, Vol. II, pp. 68–84.
 5. Darwin, D. and Nami, C.K., “Energy Dissipation in R/C Beams under Cyclic Load”, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 8, 1986, pp. 1829–1846
 6. Fenwick, R.C., Tankut, A.T. and Thom, C.W., “The Deformation of Reinforced Concrete Beams subjected to Inelastic Cyclic Loading – Experiment Results”, Report No. 268, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Auckland, Private Bag, Auckland, New Zealand, Oct. 1981.
 7. Fenwick, R.C., “Shear Deformations in Seismic Response of Frame Structures”, J. of Structural Division, ASCE, Vol. 109, No. ST4, April 1983.
 8. Kaba, S.A. and Mahin, S.A., “Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis”, Report No. UCB/EERC-84/03, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkley, April 1984.
 10. Kustu, O., and Bouwkamp, J.G., “Behavior of Reinforced Concrete Deep Beam–Column Sub-assemblages Under Cyclic Loads,” Report No. UCB/EERC-75/08, Univ. of California, Berkely, CA, May, 1975.
 11. Ma, S.M., Bertero, V.V. and Popov, E.P., “Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of R/C Rectangular and T–Beams”, Report No. UCB/EERC-76/02, Univ. of California, Berkley, May 1976.
 12. Mayer, C. and Roufaiel, M., “Analysis of Damaged Concrete Frames for Cyclic Loads”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, 1983, pp. 207–228.
 13. Ozcebe, G. and Saatcioglu, M., “Hysteretic Shear Model for R/C Members”, J. of Structural Engineering, Vol. 115, No. 1, Jan. 1989, pp. 132–148
 14. Sim, Jongsung, “Inelastic Response of Reinforced Concrete Elements to Dynamic Loads”, Ph. D. Dissertation, Michigan State University, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1987.
 15. Scribner, C.F. and Wight, J. K., “Delaying Shear Strength Decay in R/C Flexural Members under Large Load Reversals”, Report UMEC 78-R2, Civil Engineering Department, Univ. of Michigan, Civil Engineering Department, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1978.
 16. Tadao, M. and Yutaka, O., “Elastic–Plastic Response Spectra for Different Hysteretic Rules”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 116, 1988, pp. 555–568
 17. Takayanagi, T. and Schnobrich, W.C., “Computed Behavior of Reinforced Concrete Coupled Shear Walls”, Civil Earthquake Studies., Structural Research Series, No. 434, Univ. of Illinois, Urbana, Dec. 1976.
 18. Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielson, N.N., “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake”, J. of Structural Division, ASCE, Vol. No. ST12, Dec. 1970, pp. 2557–2573
 19. Thom, C.M., “The Effects of Inelastic Shear on the Seismic Response of Structures”, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Auckland, Private Bag, Auckland, New Zealand, March 1983.
 20. 林實, 構造物の履歴特性について”, 京都大學 防災研究所 年報, 第28號, 1985. 4