

철근콘크리트 구조물의 비선형 이력모델

Hysteresis Models of Reinforced Concrete Structures

장 극 관*

Chang, Kug Kwan

1. 서 언

최근 내진설계 기준 제정의 기본 배경은 1)구조물은 그 수명기간동안 발생가능한 수차례의 弱震에 구조부재나 비구조부재에 손상이 없이 저항하며 2)건물수명동안 예상되는 1회 중진에 부재의 작은 손상만이 허용되며 3)수명기간내에 강진에 큰 손상이 예상되나 보수가능한 정도의 지진에 저항하도록 하는 것이다. 앞에서 언급한 기본배경 중 첫 두 범주의 지진응답에 대한 구조물의 거동은 탄성범위이고 선형 탄성해석으로 수용할 만한 수준의 정확성있는 거동을 예측할 수 있으나 세번째 범주의 강한지진에서의 구조물의 응답은 비선형범위까지 고려하여야 한다. 기술적으로 가능하다면 실제규모의 건물로 동적실험(shaking table test)이나 가상동적실험(pseudo dynamic test)을 통하여 비선형거동을 얻을 수 있으나 비용이 과다하고 복잡하며 또한 규모가 크기 때문에 실용적이지 못하다. 그러므로 비선형 동적응답해석은 실험에 의한 방법보다 신뢰성이 낮음에도 불구하고 강한 지진하의 구조물 응답예측에 유일한 실용적인 방법(practical tools)이 되고있다.

철근콘크리트 구조물의 비선형 동적응답해석은 상대적으로 단순하고 반면에 신뢰성이 있는 이력모델과 해석알고리즘의 확립에 있다. 예비단계로

서 부재의 강도, 강성, 그리고 에너지분산 등의 특성을 시뮬레이션 할 수 있는 실제적이며 개념적인 이력모델이 요구된다. 현재의 연구수준이 모든 이력응답을 고려한 모델을 제시하기엔 아직도 어려운점이 있지만 최근 십여년 사이에 이력모델링 분야에 괄목할 만한 발전이 이루어졌다. 이력모델들이 적절하게 사용되었을때 비선형응답의 예견에 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다는 것이 여러 보고서를 통해 증명되고 있으나, 이러한 모델은 특정한 부재나 구조물의 해석 및 실험에 기초를 하고 있기 때문에 그 모델의 적용은 구조물의 특성과 제한을 고려하여 주의깊게 검토한 후에 사용 되어질 수 있다.

이력모델의 신뢰성은 예견되는 응답모델의 특성에 의존되기 때문에 응답모델을 선택하기전에 이력응답의 기본특성을 이해하는것이 매우 중요하다. 본 소고는 철근콘크리트 구조물에 관련된 현재의 실험적, 해석적 연구의 수준을 정리 요약한 것으로서 이력모델에 따른 철근콘크리트 구조물의 응답과 모델의 선택시에 빈번히 만나게 되는 문제점 및 해석시 응답모델의 선택등에 대해 기술하였다. 실제적으로 R/C 구조물의 비선형 이력모델은 그범위가 매우 넓고 다양하기 때문에 일률적으로 설명하기가 매우 어려운 점이 있다. 여기서는 철근콘크리트 구조물의 이력모델의 종류 및 범위에 대하여 소개하고 그 특성 및 형성과정에 대해 간략하게 설명하기로 한다.

* 정희원, 삼성종합건설(주) 기술연구소, 선임연구원

2. 이력응답의 특성

비선형 변형이력 상태에서의 철근콘크리트 부재는 여러가지의 이력특성을 나타내는데 이러한 특성을 적절하게 모델링하면 실제에 근접한 거동을 예측할 수 있다. 이러한 해석모델링에 있어서 나타나는 이력특성은 다음과 같이 몇가지로 분류할 수 있다.

2.1 주곡선(primary curve)

주곡선은 뼈대곡선(skeleton curve) 또는 등뼈곡선(backbone curve)으로도 표현되며 단조증가 하중하에서 응력-변형, 하중-변위 관계의 포락선으로 표시된다. 그리하여 모델링의 목적으로 강도의 경계(strength boundary)를 정의하는 편리한 수단으로 사용되어진다. 실제로는 세 영역 즉 콘크리트의 균열, 철근의 항복 그리고 부재의 파괴등으로 구분되어질 수 있으나 일반적으로는 그림 1과 같이 균열을 고려한 철근의 항복까지의 영역을 유효강성으로 고려하여 크게 두 부분으로 나눌 수 있으며 사용상의 편의를 위하여 근사값을 가지는 두개의 직선으로 이상화해서 해석시에 이용하고 있다. 휨에 대한 이력모델은 주어진 단면의 해석으로 구성될 수 있다. 즉 단조증가 하중하에서 재료모델링과 단면의 수치해석을 통하여 곡선이 구성되어진다. 여기서 콘크리트의 구속효과와 철근의 변형경화현상 등도 부재항복 이후의 모멘트-곡률 관계에서의 기울기 결정에 중요한 변수가 된다. 부재의 길이에 따른 각 단면의 곡률을

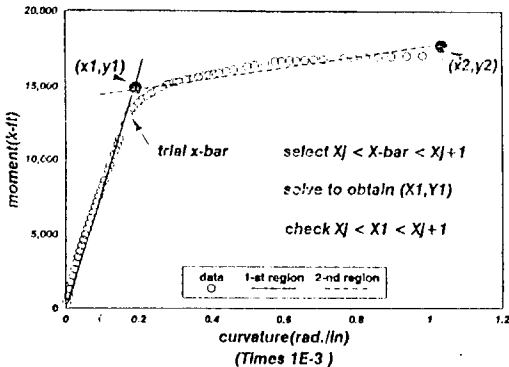


그림 1. 주곡선의 이상화(37)

적분함으로서 한지영역에 대한 모멘트-변각의 관계를 구할 수 있다. 소성힌지 길이에 따라 여러학자에 의해 경험적인 모델이 제안되고 있으나^{2, 13, 30)} 일반적으로 소성힌지길이는 부재의 유효두께 정도로 고려하고 있다.

콘크리트균열에 의한 주곡선형성에의 영향은 모멘트-곡률 관계에서는 균열에 의한 유효단면적의 감소에 의한 곡률의 증가를 고려할 수 있고 모멘트-변각 관계에서는 균열에 의한 부착력 감소로 인하여 철근과 콘크리트의 슬립 또는 정착근의 미끄러짐 발생 그리고 이에 따른 변각의 증가를 고려할 수 있다. 전단응력에 저항하는 부재는 전단 변형에 의한 추가적인 변형량이 고려되며 비탄성 전단효과에 대한 산정과 전단-전단변형 관계의 주곡선은 전단부재에서는 반드시 고려되어야 한다. 전단강도가 여러 경험적인 식에 의해 표현될 수 있지만 균열후나 항복을 넘어서 영역에서의 전단에 의한 비틀림변형은 산정하기가 상당히 어려운 점이 있다.

2.2 강성저하(stiffness degradation)

완전한 탄소성체 재료와는 달리 철근콘크리트 부재는 항복의 범위를 초과하는 이력하중하에서는 강도감소현상을 보인다. 즉 이력곡선상의 재하(load)시와 제하(unloading)시의 곡선의 기울기는 하중초기의 탄성상태에 비해 기울기 감소현상이 나타난다. 이 감소현상은 하중속도, 제하시의 최고하중 및 반복하중 회수에 비례하여 증가한다. 이런현상은 그림 2에서 잘 보여주고 있다.

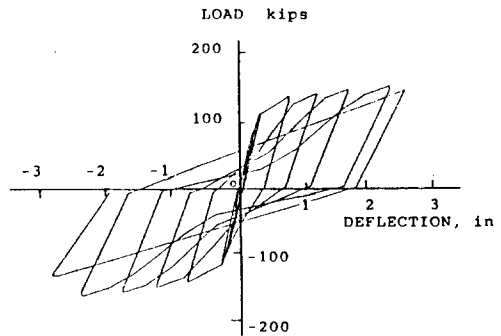


그림 2. 이력하중하의 R/C 부재의 강성저하

재하시의 기울기는 일반적으로 延性(ductility)의 함수로 나타낼 수 있는데 모멘트-곡률 관계에서는 곡률연성(curvature ductility), 그리고 하중-처짐 관계에서는 처짐연성(displacement ductility), 그리고 모멘트-변각 관계에서는 회전연성(rotation ductility)의 함수로 표현될 수 있다. 휨거동이 지배되는 부재는 대개 부재탄성계수의 延性의 제곱근의 함수^{30, 31)}로 사용되어진다.

2.3 강도감소(strength deterioration)

철근콘크리트 부재는 비탄성변형의 하중이력하에서 강도감소현상이 나타난다. 단조증가 하중하에서의 강도는 하중 반전상태에서 동등한 강도를 나타내지 못한다. 일반적으로 강도감소현상은 지배되는 변형모드, 콘크리트의 구속정도, 전단강도, 하중이력, 및 축하중의 크기등의 변수에 영향을 받는다. 그림 3은 이러한 현상을 나타내는데 이력하중하에서의 급격한 강도감소는 구조물 응답에 큰 영향을 미친다. 그러나 건물규준에 따른 적절한 설계와 보강을 통하여 이러한 효과를 감소시킬 수 있으며 아울러 강도감소현상의 발생을 지연시킬 수가 있다.

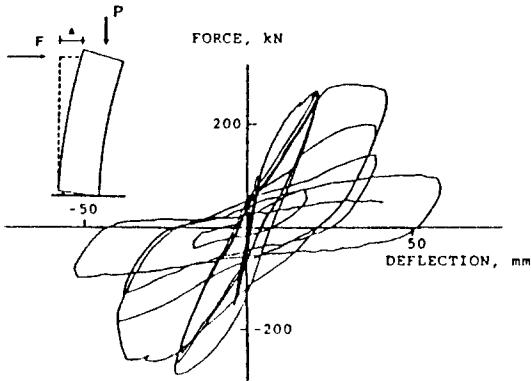


그림 3. 이력하중하의 R/ C 부재의 강도감소

2.4 핀칭효과(pinching effect)

철근콘크리트 부재의 이력곡선은 각 이력하중의 재하시에 곡선의 기울기에 현저한 변화가 생긴다. 즉 이력하중상태에서 하중재하시 초기의 급격한 강성감소현상을 ‘핀칭현상’이라고 하는데 그

림 4에서 보여주는 바와 같이 강성의 기울기에 있어서 이러한 변화는 이력하중하에서의 콘크리트 균열에 의한 부재의 유효단면적의 감소에서 기인될 수 있고, 콘크리트의 전단변형 그리고 철근의 콘크리트와의 부착 및 미끄러짐에 의한 예상변형량의 증가에서 연유될 수 있다. 이러한 현상은 철근콘크리트 부재는 물론 철골구조물의 접합부에서도 그 접합상태에 따른 물리적현상으로 생기는 일반적인 특성이다.

그림 4에서 보여주는 바와 같이 이력하중하에서의 인장균열의 열림과 닫힘에 의한 부재의 유효단면적의 증감에서 기인될 수 있는데 균열발생에 의한 유효단면적의 감소 및 이에따른 부재의 일시적 강성의 감소로 인해 기울기가 감소한다. 이력하중으로 인해 열려진 인장축 균열이 압축축에 위치하게 되고 역전하중 초기에는 발생된 균열에 의해 유효면적이 감소하고 그로인한 강성의 감소가 발생하며, 연속된 하중증가로 발생된 균열이 닫히고 이로인해 다시 압축축 유효단면적이 증가한다. 그리하여 다시 강성이 커지고 기울기가 증가한다(그림 4). 또한 일반적으로 전단변형이 부재거동을 지배하는 부재에서는 전단변형에 의한 핀칭현상이 일어나는데 전단에 의한 균열의 영향은 부착의 감소와 미끄러짐등의 현상을 동반하게 되며 사인장의 전단균열일 경우에는 이질재료의 미끄러짐이 생겨나고 이는 사인장균열의 직각방향으로 늑근을 배근하여 변형을 줄일 수 있으나 그 정도를 조절하기가 어렵다.

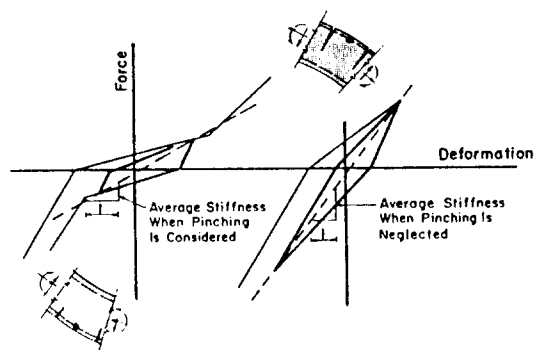


그림 4. 핀칭현상의 고려유무에 따른 평균강성

2.5 축하중 효과(axial load effect)

축하중의 작용 여부가 그림 5에 도시된 것처럼 철근콘크리트 단면의 거동에 상당한 변화를 일으킨다. 강성, 항복모멘트 그리고 항복곡률은 축하중의 크기에 따라 영향을 주기 때문에²²⁾ 축하중이 클수록 초기강성이 커지고 또 변형경화로 인하여 항복모멘트가 증가한다. 탄성강성의 증가는 축하중의 증가에서 오는 압축응력도의 확장에서 기인된다. 부재가 힘을 받을 경우에는 인장응력도가 생기지 않으며 상한치의 탄성강성이 얻어진다. 항복모멘트는 일반적으로 축력-모멘트 상호관계 곡선으로 표현된다. 항복모멘트는 평형상태까지는 축력에 비례하여 증가하고 그 이후에는 감소한다. 모멘트-곡률 관계곡선에서 항복점 이후의 기울기는 축하중의 크기, 그리고 철근의 콘크리트 구속정도에 따라 달라지며¹⁹⁾ 극한곡률은 축하중의 증가에 따라 감소한다. 왜냐하면 축하중의 증가할때 극한압축변형에 빨리 도달 하기 때문이다.

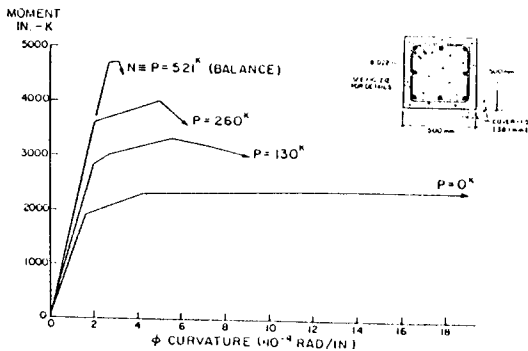


그림 5. 축하중의 크기에 따른 주곡선의 영향

건물에 있어서 기둥부재의 축하중은 지진하중에 대한 응답시 구조물의 횡변위에 의해 정적하중의 크기가 달라진다. 하중 변화에는 영향을 주는 많은 변수가 있다. 변수로는 1) 건물의 높이와 길이, 2) 골조내에서의 보와 기둥의 배치, 3) 기둥의 위치(내부 혹은 외부), 4) 기둥과 보의 모멘트 저항내력, 그리고 5) 지진의 강도 등을 들 수 있다. 특히 강한 지반운동은 항복이 생기는 위치까지 변화를 줄 수 있다. 비선형응답의 예측에 대한 축하중의 효과는 여러 학자^{15, 32, 33)}에 의해 연구되어

왔으며 그 효과는 결과에 언급되어 있지만 일반적인 결론은 미비한 실정이다. 축하중의 변화시 모멘트 곡률의 이력거동을 나타내는 기법(rule)은 재료의 응력-변형률의 관계에서의 수치적분으로 개발될 수 있고 그러한 기법은 실험적인 결과치가 없어도 해석적으로 추정될 수 있다.

3. 이력응답의 성분

부재의 처짐이나 변형은 휨에 의한 변형, 전단에 의한 변형, 그리고 인접된 부재와의 축적된 미끄러짐에 의한 변형 등으로 나눌 수 있다. 부재의 기하학적 형상, 휨 또는 전단의 상대적인 강성, 그리고 각 성분의 중요도 정도에 따라 다른 변형모드가 발생한다. 여기서의 각 변형성분과 그 상호관계는 이력응답 모델링시 고려되어야 한다. 부재 변형에서의 그밖의 다른 성분은 정착의 부실, 접합부파괴나 전단파괴등의 바람직스럽지 못한 파괴모드 등으로, 이런 변형을 고려하는것은 상당히 복잡하고 산정하기가 어렵기 때문에 양호한 부재 설계로서 효과를 최소화하거나 방지하여 이력거동 모델링 단계에서 고려되지 않도록 하는것이 바람직하다.

3.1 휨응답

이력모델의 휨응답은 모멘트-곡률의 이력관계 혹은 모멘트-변각, 하중-처짐과의 관계로 표현할 수 있다. 이 관계는 부재의 기본적인 강성감소 특성을 나타낸다. 휨이 지배하는 부재는 재하시의 강성감소 정도가 적기 때문에 에너지 흡수량이 상대적으로 크게 나타난다. 또한 실제적인 변형상태에서도 강도감소현상이 작게 나타난다. 그러므로 휨응답모델은 안정된 이력곡선을 나타내며 에너지흡수량이 큰 유연성있는 거동을 보여준다. 이러한 거동은 주로 축하중이 그리 크지않은, 그리고 전단응력이 적은 보에서 주로 나타나며 압축응력이나 전단응력이 증가하면 강도가 감소한다. 또한 콘크리트의 구속정도는 강도감소에 영향을 준다. 적절하게 확보강된 부재의 경우에는 강도감소의 발생을 지연시킬 수 있다. 그러므로 이러

한 부재의 경우에는 강성저하현상을 고려하고 편칭과 강도감소현상을 무시한 안정된 이력루프를 구성하는 단순한 이력모델에 의해 거동을 시뮬레이션할 수 있다.

3.2 전단응답

현 건물규준은 구조부재가 전단파괴가 일어나기 전에 휨에서 항복이 되도록 요구하고 있다. 이것은 휨항복보다도 과대한 전단에 대해 설계됨을 의미한다. 그러므로 부재는 전단에 대해서는 과대하게 설계되어진다. 부재가 전단에 과대하게 설계되어 있어도 전단항복은 휨항복에 의해 야기될 수도 있음을 최근에 비탄성 하중이력하의 여러 구조부재실험을 통해서 증명된 바 있다.^{23, 37)} 이 휨과 전단사이의 상호작용과 그에 따른 변형성분은 여러경우에 있어서 무시될 수 없다. R/C 부재의 전형적인 전단응답은 그림 6에 보여진 바와 같으며 휨응답의 경우보다 전단응답의 경우에 더욱 심한 편칭효과가 일어난다. 전단스팬과 두께비 혹은 모멘트-전단비가 전단응답의 발생에 중요한 역할을 한다. 큰 축력하에서 조기에 급격한 강도감소현상이 일어나는데 이러한 바람직하지 않은 특징은 충분한 횡보강근의 배근으로 해결될 수 있다. 전단의 거동모델에서는 편칭과 강성감소현상이 중요한 특징이다.

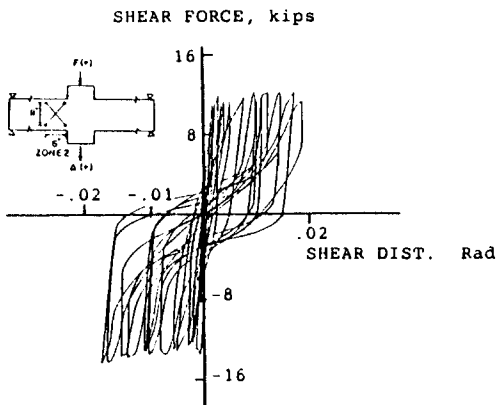


그림 6. 전단모델의 이력곡선

4. 비선형 이력 모델 분류

다양한 해석기법이 R/C 부재의 비탄성 이력거

동을 모델화를 위해 제안되어왔다. 전부재를 모델화하기 위해 사용된 기법은 필요한 정보의 종류, 해석되는 부재에 관한 형상 및 철근량 그리고 작용된 축력의 크기에 영향을 받는다. 예를들면 예비해석단계에서 혹은 전체적응답량에 대한 전반적 설계변경의 효과를 주기위해 상대적으로 간단한 해석모델이 가장 적절할 것이다. 만일 더 많은 상세한 정보가 각 부재에서의 손상정도에 관하여 요구 될수록 유한요소에 의한 접근법이 더 적절할 것이다. 부재거동을 예측하기 위해 사용되는 모델은 그 거동을 현상학적으로 이상화 시킴으로서 해석시에 효율성을 얻을 수 있다.

이력모델의 분류는 방법에 따라 여러가지로 나누어 질수 있으나 대개 모델링의 정교성에 따라 1) 부재모델, 2) 시스템모델, 하중이력에 따른 주변형의 모드에 따라 1) 휨 모델, 2) 전단모델, 비선형성의 분포상태에 따라 1) 집중힌지 모델 (lumped or concentrated hinge), 2) 분포된 힌지 모델 (spread hinge), 그리고 작용되는 축력의 종류에 따라 1) 일정 축하중모델 (constant axial load), 2) 변동 축하중모델 (varying axial load)로 구분할 수 있다. 또한 변동축하중에서도 물리적인 값의 함수와 비례하는 비례 축하중모델 (proportional axial load)과 상관관계가 없는 무비례 축하중모델 (nonproportional axial load) 등으로 세분할 수 있으나 일반적으로 비선형동적응답 계산에 사용된 방법은 모델링의 정교성에 따라 1) 전체모델 (1 자유도 모델), 2) 불연속 요소 모델, 3) 섬유형 (fiber, filament) 모델, 4) 유한요소 모델 등으로 구분할 수가 있고 축하중의 형태에 따라 1) 일정축하중, 2) 변동축하중 등으로 구분할 수 있다.

4.1 정교성에 따른 모델

부재의 위험지역에서의 손상을 모델링 하기 위해 몇가지의 기본 접근방법이 사용될 수 있다. 첫 번째 범주는 비선형성이 부재 단부에 고려될때, 두번째는 분포된 힌지 즉 손상이 부재길이를 따라 여러 단면에서 일어나는것으로 가정한 모델을 들 수 있다. 실험에 의한 이력모델은 주로 캔티레버

기둥이나 보-기둥의 조인트 실험체를 통하여 얻어지며 다양한 형태의 실험으로 2방향 횡력의 단조 증가 하중의 효과에 관한 연구가 대부분이고 지진력의 반복하중 조건에 의한 실험은 그리 많지않는 실정이다. 실험시에는 단순하게 이상화된 하중이력이 요구되기 때문에 주로 축력을 무시한 상태에서 실험이 행하여 지고 일정하중 상태에서도 연구되고 있다. 최근에는 일축 혹은 이축휨상태에서의 변동축력(횡력에 비해)하에서 실험적으로 연구되고 있다.^{1, 14, 15)} 수개의 논문에는 횡력에 비해하지 않는 변동축하중하에서의 실험적 연구도 발표된 바 있다.^{16, 17, 33, 34)}

전체 모델(structural model)

Saiidi 등에 의해 제안된 모델형태로서 1 자유도 모델은 해석모델의 첫번째의 분류에 포함될 수 있다. 이 모델은 지진에 대한 구조물의 응답은 1차 모드에 의해서 지배된다고 가정할 수 있으므로 그림 7 에서와 같이 구조물을 집중된 질량과 강성을 가진 1자유도계로 감소시킬 수가 있다. 다자유도계에서 이 단순모델의 일반적인 형태는 전단보 구조물의 형태로 치환할수 있으며 비선형 전단스프링이 각층의 강성을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

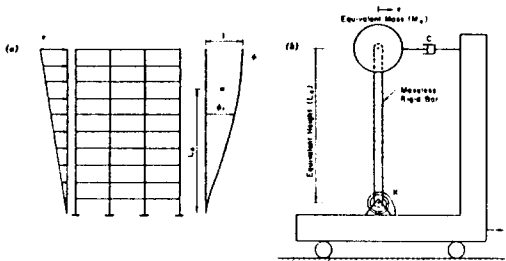


그림 7. 다층구조물의 시스템모델

이 모델은 복잡한 구조물에 대해 1 차모드 기여에 대한 가정이 과다 단순화로 볼 수 있고 덧붙여서 전단보개념(보가 기둥보다 강하게 설계된 구조)이 기둥에서 힌지가 생기지 않게 하는 일반적인 내진설계 개념과는 상반되는 것이기 때문에 그 모델의 단순성과 규칙적인 구조물의 최대응답을 예견하는데 있어서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으나 지진하중에 대한 세분화된 구조응답을 예

견하는데는 충분하지 못하다.

불연속 요소모델(discrete spring model)

비탄성거동이 예상되는 보의 일부를 일련의 직렬 혹은 병렬연결된 비선형 스프링으로 가정하고 일축횡력에 의한 보-기둥 모델이 일련의 현상학적 규칙에 의하여 조절되는 비탄성 회전 스프링으로 위험단면을 이상화한 것으로서(그림 8) 골조구조물에서는 가장 일반적으로 사용되는 모델이다.

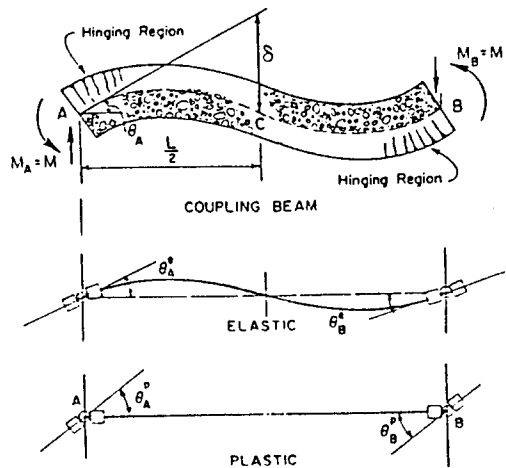


그림 8. 불연속 요소모델

이상화된 소성힌지 지역을 제외한 부분은 탄성을 유지하는 것으로 가정되며 제안된 규칙은 탄성 범위에서는 축하중에 의한 영향이 고려되지 않으며 수개의 현상학적이 모델만이 항복이나 파동형의 축하중에서 일어나는 축하중의 변화를 고려하고 있다. 소성이론을 사용하여 2차 혹은 3차원까지 현상학적인 규칙을 확장시킬 수 있다. 탄소성 재료에 대한 접근시도는 철골구조물에 대하여 적합하나 철근콘크리트 구조물에 대해서는 제한된 범위에서 사용 가능하다. 일반적으로 이 모델에서는 강도감소현상이 고려되지 않으나 Takizawa 와 Aoyama는 3선형 곡선과 이력하중에서의 일련의 강성저하현상을 고려하여 수정된 공식을 사용하였으며 일정축하중이 사용되었다. 소성모델은 이축모멘트평면에서의 균열과 항복면을 나타내는 두개의 타원으로 구성된다. 균열면은 항복상태로

부터의 제하단계와 마찬가지로 초기휨균열에 대한 강성변화를 조절하기 위해 사용되기 때문에 그 형태는 경험적으로(empirically) 결정된다. 이력곡선에 대한 기법은 이질재료의 상대적인 미끄러짐과 이질재료의 두 표면의 팽창은 소성이론에 근거를 두고 있다. 이것은 표면적으로 현상학적인 모델의 결과이고 기본가정은 소성접근방법에 근거한다. 이 접근방법은 변동축하중을 포함하는 더 복잡한 상태의 표현에 까지 확대된다. 이 경우에는 현상학적인 기법이 축하중과 변장률과의 관계, 그리고 3차원적 소성모델이 고려될 수 있다.

섬유형모델 (fiber or filament model)

이 모델은 유한요소 해석법에 기초한 것으로 복잡한 하중이력하에서 R/C 부재나 구조물의 해석에 더 적합하다. 이러한 모델에서 그림 9 에서 보여주는 바와 같이 각 부재는 여러개의 요소로 나누어지고 각 요소들은 fiber(2-D) 나 filament(3-D)로 세분할 수가 있다. 각 섬유에 대한 1축 응력-변형 관계로 부터 각 요소 끝의 강성이 결정된다. 요소강성매트릭스는 부재의 길이에 따라 강성을 적분함으로써 산정될 수 있다. 그러므로 철근과 콘크리트의 응력-변형 관계가 부재단면의 특성을 규정하는데 사용된다. 이것은 복잡한 하중하에서 그러한 모델링을 매우 효과적으로 할 수 있다. 이러한 모델의 불리한점은 계산량의 과다

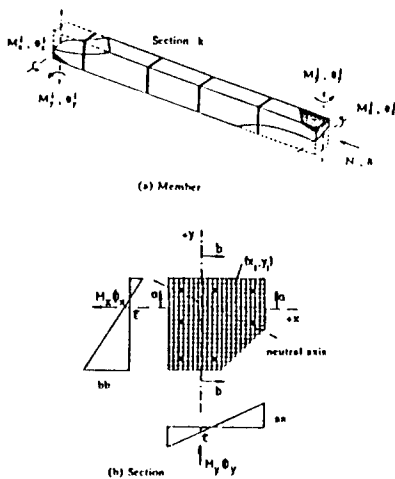


그림 9. R/ C 부재의 섬유형모델

로 인해 효과적이지 못하다는데 있다. 그러므로 큰 구조물 해석시에 실용적으로 사용하기가 어렵다. 최근에는 계산상의 효율성을 높이기 위해 변수보간함수를 이용하는 경향이 있다.

유한요소 모델 (finite element model)

콘크리트의 파괴나 균열 및 부착의 효과를 고려하기 위해서는 유한요소모델을 사용할 수가 있다. 그런데 이축하중, 부착 및 균열의 효과는 컴퓨터의 계산량 증가의 원인이 되고 이러한 해석방법은 전체구조물에 대해서는 거의 불가능하다. 유한요소모델에 있어서 서로 다른 요소를 혼합 사용하여 부재를 모델링할 수 있다. 그림 10 에서와 같이 철근콘크리트 구조물에서는 두 가지의 서로 다른 재료부재로서 모델화 할 수 있다. 그러한 이상화 과정에서 콘크리트를 나타내기 위해 연속 평면응력요소가 사용되고 철근은 바(bar) 요소를 사용한다. 문제의 위상에서의 변화는 균열을 나타내는 절점의 분리에 의해 일어나는데 이러한 모델의 이용은 계산상으로 상당히 복잡하고 거동의 특성을 정확하게 규명하기가 사실상 곤란하다. Nilson 과 Ngo는 균열의 방향을 메쉬(mesh) 경계선을 따라 고정시켰고 매년 균열 접근방법은 다른 대안이 될 수 있다. 많은 연구가들은 R/C 구조물의 거동을 연구하기 위해 유한요소모델을 사용하고 있으나 섬유모델과 유사하게 이 모델은 컴퓨터의 계산량이 증대되고 그에따른 경제성이 문제가 되기 때문에 대부분의 유한요소 연구는 단면주위의 거동을 이상화시켜 사용하고 있다.

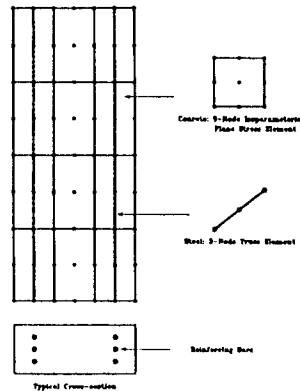


그림 10. R/ C 부재의 유한요소모델

4.2 축하중의 상태에 따른 분류

지금까지의 R/C 부재의 거동에 대한 대부분의 연구는 일정축하중상태에서의 부재의 휨거동에 국한되어왔다. 즉 단조중가 횡하중에 따른 일정한 축력의 크기에 따라 강성의 변화 및 부재의 연성의 영향을 고려하였으나²⁴⁾ 모델에서의 변동축하중의 영향을 고려한 경우는 그다지 많지 않은 실정이다. 축력의 변화에 따른 부재의 이력 휨거동에 대한 영향은 축하중의 이력형태에 따라 비선형응답의 탄성과 비탄성의 영역에서 민감한 부재의 거동을 보인다. 비례축하중을 고려하였을 경우에는 일반적으로 축하중이 휨모멘트와 휨처짐의 함수로 비례할 경우를 가정 할 수 있다. 축하중-휨모멘트 상호 관계곡선에서의 휨모멘트에 직접 비례할 경우를 고려해보면 축하중이 감소할 때에는 축하중의 감소로 인한 중립축의 압축축으로의 이동과 열려진 균열로 인한 유효단면적의 감소에서 기인될 수 있고, 축하중의 변화로 인한 철근의 바우싱효과(Bauschinger effect)로 인해 제하시의 기울기와 하중역전시의 기울기가 일정축하중에서의 그것보다 작아지는 경향을 보인다(그림 11). 그런데 축하중의 크기가 어느변수와도 비례하지 않는 변동축하중이 작용할 때에는 이력모델의 형태에 영향을 준다. 그림 12는 일정축하중과 변동축하중의 경우에 휨력에 대한 이력모델을 나타내고 있다. 도시된 그림에서 보여주는 바와 같이 변동축하중의 경우는 이력곡선이 더이상 일반적인 Masing 형태가 아님을 보여주고 있고 그러한 거동특성은 축력의 시간적변화에 따른 휨력과의 비연성관계에서 부재의 강성, 강도, 연성의 변화에서 기인한다. 에너지 분산 면에서 보면 비례성이 없는 축하중 하에서의 부재는 물리적으로 에너지를 분산하지 못하는 것으로 설명되어질 수 있다. 이것은 많은량의 소성변형이 발생한것을 추론할 수 있다. 그런데 Saadeghvaziri³⁴⁾의 연구 결과는 부에너지 영역이 정에너지 영역보다 클 수가 있는데 이는 그 부재가 에너지를 흡수한 양보다 발생한량이 더 커진 경우와 같은, 실제로 일어나기가 불가능한 경우도 생긴다. 그러한 거동에 대한 물리적 설명은 실제로 부재의 거동이 1 자유

도계에 가깝기 때문에 모든 자유도를 이력모델에 고려해야 한다. 수학적으로는 면적의 크기가 아닌 체적의 크기가 에너지량의 산정에 고려되어야 하고 횡하중과 변위의 관계는 R/C 부재의 모든 내진능력을 표현할 수가 없으며 축하중과 변형이력에너지의 관계도 중요한 변수로 고려되어야 함을 의미한다. 실제적으로 모든 R/C 부재의 손상 모델에 대한 이해는 분산된 에너지와 최대변위나 곡률의 정도에 기초하기 때문에 부재의 총에너지 분산능력에 기여하는 다른 성분에 대한 지식이 요구된다.

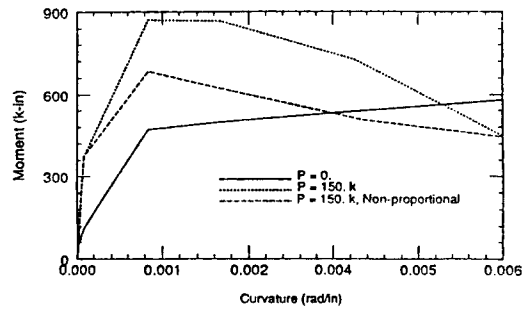


그림 11. 축하중의 형태에 따른 주곡선의 영향

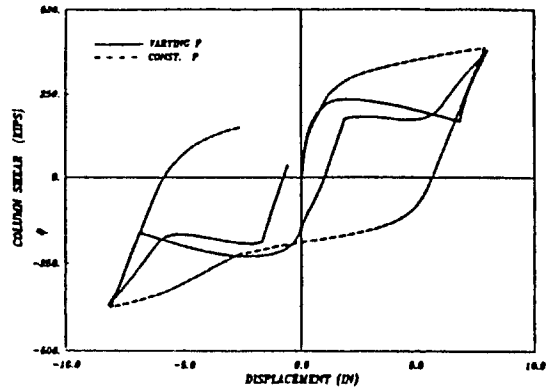


그림 12. 축하중의 형태에 따른 R/C 부재의 이력곡선

축하중이 작용하는 휨부재의 거동을 이해하는데 부가적인 개선책으로 많은 실험적, 해석적인 연구가 진행 되어왔다. 그런데 거동이 복잡하고 하중이력이나 경계조건, 형상 및 부재의 상세등을 포함하는 여러 변수에 의해 영향을 받고 특히 하중의 속도나 축하중의 종류에 따라 강성저하나 강

도감소등의 현상이 다르게 나타나기 때문에 실제 설계시에는 이러한 결과를 전 구조시스템에서와 마찬가지로 부재에 대해서 해석적 혹은 실험적 연구의 통합의 의해 고려되어야 한다.

5. 결 언

이력거동은 부재의 특성과 작용된 하중의 형태에 따라 영향을 받는다. 이 거동은 전형적인 응답을 규정지을 수는 없지만 R/C 부재의 기본적인 응답특성을 나타낼 수 있다. 현재의 알려진 콘크리트의 특성 및 기계적 성질만으로 R/C 부재의 이력응답을 정확하게 표현하기가 상당히 어렵다. 실제적으로 비탄성해석의 만족할 만한 수행유무는 알려져 있는 응답의 특성의 적절한 고려, 거동 예측을 할수있는 능력, 그리고 이러한 특성을 고려한 모델의 선택에 달려있다. 이러한 것이 해석자의 R/C 응답에 대한 지식을 통하여 요구되지만 응답의 성공적인 예측을 보장하는것은 아니다. 해석모델은 전체적응답 뿐만 아니라 국부응답에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있어야 하므로 여러 해석방법들의 수행능력과 한계성이 충분히 규명이 되어야 한다. 현재 개발되고 있는 컴퓨터 프로그램은 이러한 기술을 복잡한 구조물의 설계나 더욱 신뢰성있는 설계법의 개선에 사용되질 수 있다.

이상과 같은 이력모델의 고찰에 있어서 응답모델링에서의 가장 중요한 부분은 주곡선의 형성에 있다. 특히 부재의 항복 이전에 발생하는 균열은 부재의 초기강성을 감소시키기 때문에 주곡선의 형성에 반드시 고려되어야 한다. 구조물의 이력응답 해석에서는 상대적으로 단순한 이력모델의 선택으로 비탄성응답의 적절한 예견이 바람직하나 모델의 불확실성을 염두에 두어 결과의 정확도에 지나친 신뢰를 두는것은 금물이라 하겠다.

참 고 문 헌

1. Abrams, D. P., "Influence of Axial Force Variations on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns" ACI Journal, May-June 1987, pp.246-254
2. Arzoumanidis, S. and Meyer, C., "Modeling Reinforced Concrete Beams Subjected to Cyclic Loads" Dept. of Civil Engr. Techn., Columbia University, New York March 1981
3. Chang, K. K., "Nonlinear Dynamic Response of R/C Structures Using Sets of Eigenvectors" Ph. D. Dissertation, University of California, Los Angeles, 1992
4. Chung, Y. S. and C. Meyer, and M. Sinozuka, "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members," "Technical Report NCEER-87-0022, October, 1987
5. Corley, W. G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams," Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 92, No. 10, October 1966
6. Darwin, D. and D. A. Pecknold, "Inelastic Model for cyclic Biaxial Loading for Reinforced Concrete," Civil Engineering Studies, SRS, No. 409, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, July 1974
7. Emori K., W. C. Schnobrich, "Analysis of Reinforced Concrete Frame-Wall Structures for Strong Motion Earthquakes," Civil Engineering Studies, SRS, No. 457, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, December 1978
8. Fillipou, F. C., Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Effect of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints," Report No. UCB/EERC-83/19, University of California, Berkeley, Aug. 1983
9. Fillipou, F. C., "A Simple Model for Reinforcing Bar Anchorages under Cyclic Excitations," Report No. UCB/EERC-85/05, University of California, Berkeley, March 1985
10. Fukuzawa, et al, "Elastic-Plastic Earthquake Response Analysis of R/C Frame in Consideration of Fluctuation of Axial Forces on Columns," Proc., 9WCEE, Japan, 1988
11. Jiang, Y., and M. Saiidi, "Four-Spring Element for Cyclic Response of R/C Columns," Journal of the Structural Engineering, ASCE,

- Vol. 116, No 4, April 1990
12. Kaba, S. A., and S. A. Mahin, "Reinforced Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis," Report No. UCB/EERC-84/03, University of California, Berkeley, California, April 1984
 13. Keshavarzian, M. and Schnobrich, W., "Computed Nonlinear Analysis of R/C Coupled Shear Walls" Proceedings 8-th World Conference of Earthquake Engineering, San Francisco, July 1984
 14. Kreger, M. E., and L. Linbeck, "Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Lateral and Axial Load Reversal." Proceedings, 3-rd U. S. National Conference on Earthquake Engineering, August, 1986
 15. Lai, S., Will, G. and Otani, S., "Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members" Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, ST 11, April 1984 pp.2563-2584
 16. Li, K., and H. Aoyama, "Reinforced Concrete Columns Under Varying Axial Load and Bi-directional Lateral Load Reversals," Proc., 9WCEE, Japan, 1988
 17. Li, K. L., Otani, S. and Aoyama, H., "Reinforced Concrete Column under Varying Axial Load and Bi-Direction Horizontal Load Reversals," Pacific Conference on Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand, 1987
 18. Mahin, S. A., "Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Columns Under Multidirectional Seismic Excitations," Report No. UCB/EERC-88/17, University of California, Berkeley, Nov. 1988
 19. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete" Journal of Structural Engineering Vol. 114, No. 8 August 1988, pp. 1804-1826
 20. Newmark, N. M. and Rosenbluth, E., "Fundamentals of Earthquake Engineering" Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971
 21. Ngo, D. and A. C. Scordelis, "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Vol. 64, No. 3, March, 1967, pp. 152-163
 22. Oesterle, R. G. et al., "Earthquake Resistant Structural Walls-Tests of Isolated Walls-Phans-II," "Report to NSF CTL, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1979
 23. Otani, S., "SAKE-A Computer Program for Inelastic Analysis of R/C Frames to Earthquakes" Civil Engineering Studies, SRS, No. 413, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, November 1975
 24. Ozcebe, G. and Saticioglu, M., "Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 76, No. 11, November 1979, pp. 1179-1195
 25. Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures" John Wiley and Sons, New York, 1975
 26. Park, Y. J., and A. H. -S. Ang, "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, April, 1985, pp. 722-739
 27. Pique, J. R., "On the Use of Simple Models in Nonlinear Dynamic Analysis." Publication No. R76-43, Department of Civil Engineering, M. I. T., Cambridge, September, 1976
 28. Ramirez, H. and J. O. Jirsa, "Effect of Axial Load on Shear Behavior of Short Reinforced Concrete Columns under Cyclic Lateral Deformations." "PMFSEL Report No. 80-1, The University of Texas at Austin, June 1980
 29. Ristic, D., Yamada, Y. and Lemura, H., "Inelastic Stress-Strain Based Seismic Response Prediction of RC Structures Considering Dynamically Varying Axial Forces." Proceedings, 9WCEE, Japan, 1988
 30. Roufaiel, M. and Meyer, C., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames for Dynamic Loading" Department of Civil Engineering Technical Report, Columbia University, New York, December 1981
 31. Saiidi, M., and M. A. Sozen, "Simple and Com-

- plex Models for Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structures," Civil Engineering Studies, SRS, No. 465, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, December 1979
32. Saadeghvaziri, M. A., "Behavior of R/C Columns Under Uncoupled Variations in Lateral and Axial Loads," Proceedings of the 4-th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, May 1990
 33. Saadeghvaziri, M. A. and Foutch, K. A., "Inelastic Behavior of R/C Highway Bridges under Horizontal and Vertical Earthquake Motions" Civil Engineering Studies, Structural Research Series, No. 540, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, June 1988
 34. Saatcioglu, M. and Ozcebe, G., "Effect of Bar Slip on Hysteretic Behavior of Concrete Columns," Proc. of the 5-th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, 1987, pp.833-839
 35. Saatcioglu, M and Derecho, A. T. and Corley, W. G., "Modeling Hysteretic Behavior of Coupled Walls for Dynamic Analydid," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11,1983, pp. 711-726
 36. Saatcioglu, M. and Ozcebe, G., "Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading," ACI Structural Journal, Vol. 86, No. 1 January-February 1989, pp. 3-12
 37. Saiidi, M., "Hysteresis Models for Reinforced Concrete," Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 108, No. 5, May 1982, pp. 1077-1087
 38. Saiidi, M. et al, "Five-spring Element for biaxially Bent R/C Columns," Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No 2, Febemember 1989, pp.2557-2573
 39. Soleimani, D., Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Beam-Column Suassemblages," ACI Journal, Vol. 76, No. 11, November 1979, p. 1179-1195
 40. Takeda, T., M. A. Sozen, and N. N. Nielson, "Reinforced Concrete Responde ot Simulated Earthquake," Journal of Structural Division, ASCE, vOL. 96, ST 12, December, 1979
 41. Takizawa, H., "Notes on Some Basic Problems in Inelastic Analysis of Planar R/C Structures, PartI and II" Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 96, ST 12, December 1970, pp.2557-2573
 42. Zeris, C., "Three Dimensional Nonlinear Response of Reinforced Concrete Buildings" Ph. D. Thesis, Univ. of California, Berkeley, 1986
 43. Zeris, C., and S. Mahin, "Analysis of reinforced Concrete Bean-Columns Under Uni-axial Excitation," Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No 4, April 1988