

반복하중을 받는 철근 콘크리트 요소

RC Elements Under Cyclic Loading



최 석 환*

이번 기사에서는 반복하중 하에서의 철근 콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석에 관한 연구를 정리한 CEB 보고서를 소개하고자 한다. 보고서의 분량이 190쪽으로 번역기사의 내용으로는 많지만, 매우 유익한 내용이라 생각되어 선택하였으며, 구체적인 수식은 생략하고 전반적인 내용의 흐름을 위주로 정리했다.

이 보고서의 내용은 콘크리트의 압축거동, 콘크리트의 인장거동, 철근의 거동, 콘크리트와 철근의 부착, 철근과 콘크리트 혹은 콘크리트와 콘크리트의 경계면 거동, 그리고 철근콘크리트의 유한요소모델링 등으로 이루어져 있다.

1. 인장 또는 압축을 받는 콘크리트의 거동

1.1 인장응력을 받는 콘크리트의 거동

콘크리트에 인장응력을 가하면 금속과는 달리 변형경화가 나타나지 않으며, 탄성한계에 도달하

면 바로 연화현상(strain softening)이 나타난다. 콘크리트는 최고응력점에 도달하기 훨씬 전에 미세균열이 형성되기 시작하며, 최고응력 근처에서 이 미세균열들이 상대적으로 약한 골재경계면을 따라 주균열을 형성한다. 이후 균열대가 점점 국소화되면서 결국에는 하나의 균열에 모든 변형이 집중된다. Hillerborg의 가상균열모델(fictitious crack model)에서는 균열대에서 일어나는 균열을 크기 w 로 나타내어지는 하나의 가상균열로 표현한다. 단일 균열이 형성된 후에는 응력이 골재연동(aggregate interlock)에 의해서 전달된다. 단조하중 하에서는 많은 실험결과 및 모델이 제안되었으나, 반복하중 하에서는 그 수가 매우 제한되어있다. 그림 1은 Reinhardt¹⁾가 수행한 실험의 결과이다.

콘크리트의 인장거동을 나타내는 연속함수모델은 응력과 균열 사이의 관계를 정의한다. 균열의 크기는 Hillerborg²⁾의 가상균열모델에 의해서 정의된다. 그림 2는 실험적으로 얻어질 수 있는 곡선

* 연안항공공학연구소 센터 항공공학연구소, 선임연구원

인데, 하중이 감소할 때의 거동곡선 (I)과 다시 재하할 때의 경로 (III)가 기본적인 골격을 형성한다.

1.2 압축응력을 받는 콘크리트의 거동

압축응력을 받는 콘크리트를 모델링할 때의 이론적인 기초는 크게 세 가지로 분류할 수 있는데, 그것은 탄성이론, 소성이론, 그리고 점진적 손상(progressive damage)이론이다. 탄성모델은 실제 거동과 많은 차이를 보이지만, 적용이 쉽기 때문에 많이 사용되어왔으며, 철근 콘크리트 구조물의 다차원 해석에 제일 먼저 사용되었다. 초

기에는 비례하중에 제한적으로 적용되었으나, 현재는 반복하중에도 적용된다. 소성이론은 콘크리트보다는 금속재료에 더 적합한 이론이지만, 콘크리트에도 적용되어왔다. 미세균열이 점진적으로 발전해 나가는 현상을 설명하는 모델은 크게 파괴모델과 연속체손상모델의 두 가지로 나눌 수 있다. 이들은 매크로 규모의 모델에 적절한 변수를 도입하여 미세한 재료의 점진적인 손상을 표현한다. 그러나 개념적으로 더 발전된 형태는, 반대로 재료의 미세구조에서 출발하여 매크로 규모의 응력-변형도 관계를 도출해 내는 것이다. 이러한 시도 중에 어느 정도 실용단계에 도달했다고 할 수 있는 것은 미세면 모델(micropplane model) 정도이다.

삼차원 응력 하에서 반복하중을 고려한 경우, 최고하중 이후의 거동에 대한 실험적 연구결과가 별로 없다. 따라서 수학적인 모델들을 이용하여 이러한 거동을 설명해야 하지만, 그 효용성을 증명하는 데는 단지 일차원 혹은 이차원적인 실험과 비교해야 하기때문에 이 모델들을 적용하는 데는 신중해야 한다.

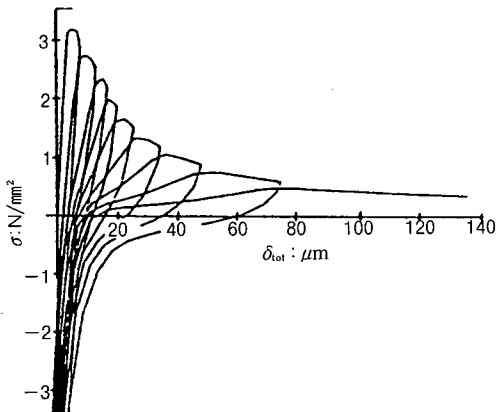


그림 1 반복인장 하에서의 콘크리트 거동

1.2.1 소성이론에 기초한 모델

소성이론의 기본은 변형률의 증가치가 탄성성분의 증가치와 소성성분의 증가치로 나누어진다는데 있다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p$$

여기서 탄성성분은 정의에 의하여 완전회복이 가능하고, 탄성 구성법칙에 의해서 정의되며, 선형 등방성으로 가정한다. 소성성분은 회복이 완전히 불가능하며 응력상태가 항복면에 도달하는 순간에 생기게 된다. 완전소성이론에서는 항복면은 고정된 면이고, 응력은 이 면의 바깥 쪽에 존재할 수 없다. 콘크리트의 비선형은 항복면 훨씬 이전부터 시작되어 점진적으로 발전되므로, 완전소성은 여러 가지 면에서 콘크리트의 거동을 설명하는 데는 적합하지 못하다. 콘크리트의 거동을 설명하는데 탄소성이론을 적용하기 위한 연구

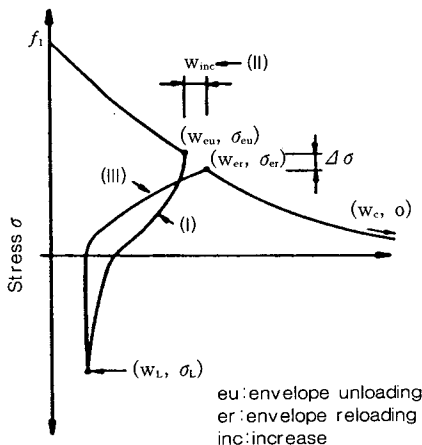


그림 2 연속함수모델 곡선

도 많았지만, 근본적인 거동의 차이를 극복하는 데는 어려움이 많았다. 이는 탄소성이론은 하중이 반복될 때 초기의 탄성계수를 그대로 유지하나, 실제 거동에서는 갈수록 강성이 저하되고 에너지가 손실되기 때문이다. 탄소성이론의 근본인 법선법칙(normality rule)은 마찰활동(frictional slip)이나 미세균열 등이 일어나는 콘크리트, 흙 등에서는 성립하지 않는다. 따라서 최근에는 소성이론에 다른 형태의 비조합유동(non-associated flow)을 이용하기도 한다. 여러 가지 이론적, 실험적 제한에도 불구하고, 컴퓨터 프로그램(ABAQUS, ADINA, ASKA, DIANA 등)에서는 탄소성이론이 가장 많이 사용되고 있다. 이것은 탄소성이론이 오랜 시간동안 깊이 연구되어 정립이 잘 된 이론이기 때문이다. 또 다른 이유는 압축응력 하에서의 콘크리트 거동이 전체 구조물에 얼마나 큰 영향을 미치는지, 즉 모델이 실제와 얼마나 가깝게 만들어져야 하는지에 대한 인식이 부족하기 때문이다.

1.2.2 미세균열 및 탄성손상역학에 기초한 모델
콘크리트 내부의 미세균열과 손상의 증가를 거시적 관점에서 설명하는데 주력한다. 여기서는 하중이 줄어들 때에, 영구변형은 일으키지 않고, 재료의 강성은 줄어들게 된다. 이런 식으로 재료의 강성을 줄이는 이론을 탄성손상(elastic damage)이라고 일컫는다. 이 방법은 점진적파괴체 또는 연속손상역학(continuous damage mechanics)의 이론을 이용하여 설명할 수 있다.

Dougill의 모델³⁾을 이용하면 점진적인 파괴가 일어나는 재료의 거동은 일반화된 후크의 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

여기서 탄성텐서 C_{ijkl} 는 변형의 경로에 따라서 영향을 받는다. 두 종류의 거동이 고려되는데, 하나는 하중이 증가하면서 재료의 강성이 약해지는 것과, 다른 하나는 하중이 줄거나 다시 하중이 가해질 때 보이는 완전탄성거동이다. 이 두

거동을 구별하고, 재료가 약해질 때의 거동을 나타내기 위하여 파괴면을 표시하는 하중함수가 도입되었다.

$$H(\epsilon_{ij}, H_e) = 0$$

여기서 H_e 는 하중경로와 관계되는 값으로 재료가 손상되면 값이 변한다. 그 결과 다음과 같은 재료의 거동을 나타내게 된다.

(a) 하중이 가해지면, 안정적이고 점진적인 파괴가 일어나면서 재료의 강성이 약해진다.

(b) 선형탄성거동을 보이면서 하중이 감소하는데, 이 경우 강성은 하중이 줄기 전까지의 파괴진행 정도에 의해서 결정된다.

(c) 응력과 변형률이 영이 되는 상태로 되돌아갈 경우에는 선형탄성거동에 의한다.

두 번째 방법은 연속손상역학에 의거한다. 이것은 손상부위가 연속적으로 발전하면서 재료가 점점 약해지는 이론이다. 가장 간단한 형태로 손상치를 이용하여 미세균열과 공동(void)의 연속적인 분포를 표현한다. 하중이 가해진 적이 없는 재료에서의 일반적인 구성관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon_{ij} = f_{ij}(\sigma_{hk})$$

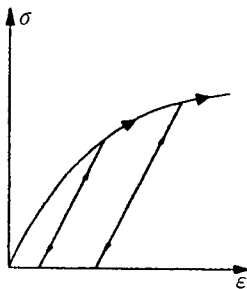
이 관계식에서 σ 대신에 응력텐서 σ_{eff} 를 사용함으로써 손상을 받는 재료에서도 적용이 가능하다. 유효 응력-변형률의 관계가 선형탄성거동을 한다면, $\sigma_{eff} = E_e \epsilon$ 이고, 공칭 응력-변형률 관계는 간단한 시컨트 관계로 표시할 수 있다.

$$\sigma = E(1-d)\epsilon = E'\epsilon, \quad 0 \leq d \leq 1$$

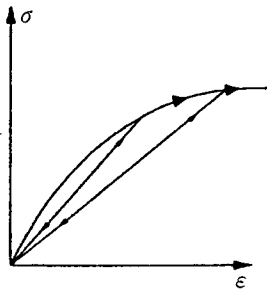
이 식은 손상 정도와 강성사이의 관계를 직접적으로 간단하게 표현한다. 이것은 하중을 감소시키면서 탄성계수를 구하는 실험에서 손상의 정도를 표현하는데 유용하게 사용될 수 있다. 이후 손상계수를 응력 및 변형의 경로에 대한 함수 관계로 주면 된다.

1. 2. 3 소성과 미세균열역학을 이용한 모델

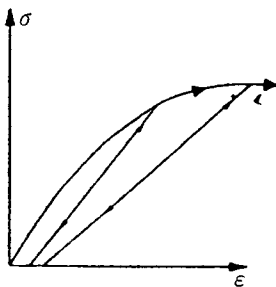
점진적인 파괴나 탄성손상이론에 근거한 모델들이 경화 및 연화, 그리고 강성이 약화되는 현상을 잘 표현하기 때문에, 실제 콘크리트의 거동과 일치하는 면이 있다. 이 모델들에서는 변형이 완전히 회복되는데, 실제로는 잔류변형이 남게 된다. 잔류변형은 소성이론으로는 설명이 잘 되기 때문에 소성이론과 파괴메카니즘을 섞은 모델에 대한 연구가 이루어지게 되었다. 이렇게 함으로써 소성-활동 및 미세균열의 증가도 표현할 수 있게 되었다. 그림 3에서 (a)는 전형적인 탄소성



(a) 경화를 고려한 탄소성 모델



(b) 탄성손상모델



(c) 합한 경우

그림 3 소성과 미세균열역학을 이용한 모델

경화 거동인데 하중이 감소할 때에 초기강성과 같은 기울기를 따른다. (b)는 탄성손상이 일어나는 경우인데, 변형이 증가함에 따라 강성이 줄어드나, 잔류변형은 존재하지 않는다. (c)의 경우는 강성도 약해지고 잔류변형도 존재하는, 보다 실제에 가까운 거동이다.

Bazant-Kim의 초기연구에서는 Drucker-Prager 형태의 파괴면과 경화현상을 이용한 고전적인 탄소성 메카니즘과 Dougill이론에 근거한 점진적인 파괴메카니즘이 복합되었다⁴⁾. 두 개의 하중면이 이용되었는데, 하나는 소성변형, 다른 하나는 파괴응력 릴랙세이션을 조절하는 것이다. 최근에는 고전적인 소성이론이 연속손상이론과 연결된 이론도 많이 나왔다⁵⁾.

1. 2. 4 일반화된 비국소 미세면 모델

콘크리트에 대한 일반화된 비국소 미세면 모델이 연구되어 왔는데, 이 방법으로 삼차원 단조하중에서 뿐만 아니라 일반적인 삼차원 반복하중 하에서도 연화현상 및 재하속도에 따른 효과까지도 고려한 콘크리트의 거동을 예측할 수 있다. 이 모델에서는 재료의 성질을 여러 면(plane)에서의 응력성분과 변형률성분을 기준으로 나타낸다. 이러한 면들은 골재의 경계면과 같은 재료의 미세구조에서 보이는 손상된 혹은 취약한 면으로 생각할 수 있다. 가장 최근에 나온 미세면 모델⁶⁾에서는 단지 몇 개의 재료적 성질을 사용하고서도 단조하중 하에서 매우 넓은 범위의 응력-변형 경로에 대해서 콘크리트의 거동을 예측할 수 있음을 보여 주었다. 이 모델은 비국소(non-local) 개념과 함께 유한요소프로그램에 이용되었으며, 수치해석적인 예제를 통해, 구조물의 거동을 실제에 가깝게 예측할 수 있다는 것이 보여주었다. 그러나 단조하중에서 뿐만 아니라 일반적인 반복하중, 그리고 재하속도효과도 고려하여 적용하기 위해서는 모델에 대한 일반화가 더 필요하다.

미세면 모델은 삼차원 모델이고, 평면응력 유한요소해석에서는 횡방향 변형률(즉, 판외변형률)은 횡방향 응력이 영이라는 조건에서 계산되어야 한다. 그림 4는 반복 인장에서, 그리고 그

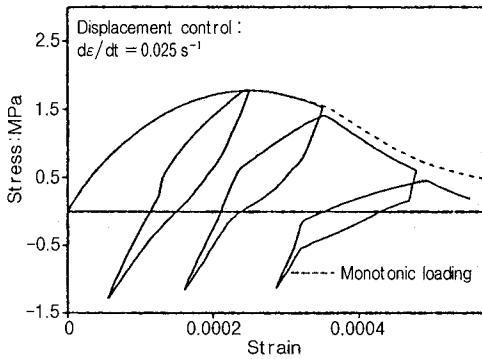


그림 4 일축 반복하중 하에서의 계산된 콘크리트의 인장거동

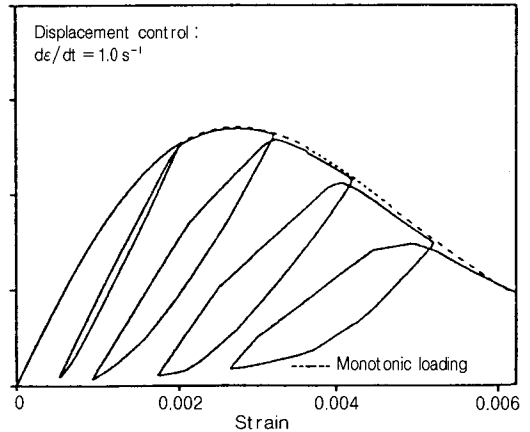


그림 5 일축 반복하중 하에서의 계산된 콘크리트의 압축거동

림 5은 반복압축에서, 그리고 그림 6은 반복전단에서의 거동을 해석한 것이다. 이 결과에서 보듯이 반복 미세면모델을 이용함으로써 콘크리트의 반복하중에 대한 거동을 똑같은 재료적인 영향자를 사용하면서도 서로 다른 응력변형률을 실제에 가깝게 예측할 수 있다는 것을 보였다.

2. 철근 및 경계면에서의 거동

지금까지 제안된 대부분의 모델은 철근 콘크리트에 사용되는 보강철근이 아니라 일반적인 철의 이력거동을 나타내는 것들이었다. 실제 철근 콘크리트 구조물에서는 반복하중이 가해질 때 압축 변형보다는 인장변형이 훨씬 더 많이 일어난다. 이것은 콘크리트 덮개가 벗겨지기 전까지는 균열이 닫히고 콘크리트와의 부착이 약해지면서 압축 방향으로는 과도한 변형이 일어나지 않기 때문이다. 소구간 선형모델이 과거에 많이 제안되었지만 간단한 비선형모델이 훨씬 낫다. 그러나 단순성과 정확성 사이에는 타협이 필요할 것이다.

반복하중 하에서의 철근콘크리트 구조물의 거동은 철근과 콘크리트의 상호작용에 따라서 매우 큰 영향을 받는다. 구조물의 내진설계에 있어서 경제적인 설계를 위하여서는 비선형거동을 고려하여, 지진에너지 흡수, 소산시킬 필요가 있다. 지진으로 인해 구조물이 손상, 파괴되는 것을 막기 위해서는 구조물의 취성파괴를 줄이고, 반복하

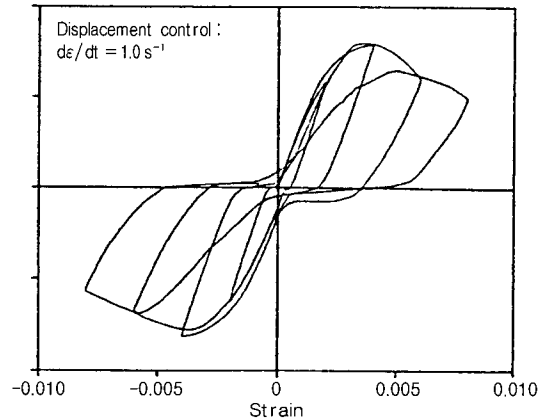


그림 6 반복전단 하에서의 계산된 콘크리트의 거동

중으로 인하여 강성 및 강도가 줄어드는 것을 최소화하여야 하며, 또한 이력거동을 통해서 충분한 에너지가 없어질 수 있도록 설계되어야 한다.

철근 콘크리트에 있어서 취성파괴 원인 중의 하나는 철근과 콘크리트사이의 부착이 갑자기 사라지면서 심각한 국부적인 손상이 생기는 데 있다. 이로 인해 강한 지진 하에서는 구조물 자체가 파괴되는 데까지 이르게 된다. 정착파괴가 일어나지 않더라도 이력거동은 철근과 콘크리트의 부착에 큰 영향을 미치게 된다.

반복하중은 반복회수에 따라 반복회수가 작지만 매우 큰 부착응력을 보이는 경우와 반복회수

는 수천 혹은 수백만회나 되지만 부착응력은 작은 값을 보이는 경우로 나눌 수 있다. 지진이나 풍하중의 경우가 전자에 해당하고, 교량이나 해양구조물에서의 피로하중은 후자에 속한다고 할 수 있다. 후자는 허용응력의 범위에서, 그리고 전자는 극한하중의 범위에서 다루어진다.

2.1 부착거동

교반하중 하에서의 실험에서는 하중이 변위제어나 아니면 하중제어나, 혹은 재하속도가 얼마냐 등에 따라서 결과가 달라진다. 실제 지진하중은 변위제어와 하중제어의 중간형태를 띠며, 넓은 주파수대를 가진다. 이 분야에서 많은 연구가 진행되어왔고^{7)~13)}, 여러 해석적인 모델이 제안되었는데, Morita-Kaku¹⁴⁾, Tassios¹⁵⁾, Viwathana-tepa¹⁷⁾, Hawkins¹⁰⁾, Balazs⁹⁾, Ciamp¹⁶⁾, Pochanart-Harmon¹³⁾ 등이 대표적이다.

방향이 바뀌는 반복하중에서는 부착강도와 부착강성이 약화된다. 이러한 현상은 주로 이전 사이클에서 도달한 최고 활동거리에 따라서 그 정도가 정해진다. 다른 중요한 인자로서는 콘크리트의 강도, 구속조건, 반복하중회수 등이다. 같은 조건하에서는 활동이 완전히 역전되는 경우에 가장 많은 손상을 받게 된다. 부착손상은 미세균열이 증가하면서, 철근에서의 균열이 전파되면서 점점 축적되어간다. 약간 복잡한 모델들을 이용하면, 콘크리트 안에 있는 철근에 대한 지진거동을 상당히 정확히 예측할 수 있을 것이다.

2.2 경계면에서의 거동

철근 콘크리트 요소의 거동에서 콘크리트와 철근사이 혹은 콘크리트와 콘크리트 사이의 경계면 거동은 매우 중요한 역할을 한다. 콘크리트와 철근사이의 응력의 전달은 종방향으로는 부착으로, 그리고 횡방향으로는 다우웰거동으로 이루어진다. 어떤 면에서의 전단력은 국부적으로 철근 속의 전단력, 휨 등의 형태로 전달된다. 이것을 다우웰거동이라 한다. 이 다우웰거동은 철근의 주

면에 붙어있는 콘크리트의 저항능력에 의해서 영향을 많이 받기 때문에 경계면의 특성같은 미세한 것 뿐 아니라 구조적인 조건에도 영향을 받는다.

골재연동(aggregate interlock)은 균열면에서 상대적인 변형이 생기면서, 그로 인하여 직접적인 지압, 접촉 등으로 전단력이 전달되는 현상이다. 골재의 연동은 궁극적으로 재료성질의 문제이다. 왜냐하면 단일균열의 거동은 콘크리트의 성질, 예를 들면 최고 골재치수, 골재의 형상, 콘크리트의 인장강도 등에 밀접하게 연관되어 있기 때문이다. 다시 말하면 균열이 비교적 조밀하게 평행으로 분포하고 있다면, 골재연동에 대한 구성방정식은 전체적인 응력-변형률의 관계식으로 나타낼 수 있다.

지진하중과 같은 교반하중이 발생하면, 수직방향으로 보강된 구조물에서는 골재연동과 다우웰거동을 통해서 수직, 수평균열을 통해서 전단력이 전달된다. 균열의 크기가 작을 때는 골재연동이 다우웰거동보다 큰 비중을 차지하나, 경계면의 변위가 증가하게 되면, 다우웰거동이 더 큰 비중을 차지하게 된다.

2.2.1 골재연동

지금까지의 골재연동(aggregate interlock) 연구에 포함된 영향요소들은 균열의 크기, 활동, 골재의 강도, 구속조건, 골재의 크기, 표면의 거칠기 등이다. 그러나 경로의존적 거동, 반복하중, 혹은 3차원거동 등에 대해서는 아직 별로 연구된 바가 없다. 지금까지 단조하중이 작용하는 평면 균열에 대해서 연구가 많이 이루어졌다.

여러 모델들 중에 반복하중 하에서도 비교적 잘 적용될 수 있다고 생각되는 것은 일반화된 거친균열(generalized roughness crack) 모델¹⁸⁾, 거친균열모델¹⁹⁾, 이상(two-phase) 모델²⁰⁾, 접촉밀도(contact density) 모델²¹⁾, Isenberg-Adham 모델²²⁾, Duchon 모델²³⁾, Collins 모델²⁴⁾, Perdikaris-White 모델²⁴⁾ 등을 들 수 있다. 이 중에서 일반화된 거친균열모델, 미세면모델, 접촉밀도모델 등은 DIANA 프로그램에 포함되었다.

2.2.2 다우웰거동

골재연동은 재료적 성질이라고 볼 수 있으나, 다우웰거동(dowel action)은 배근상세, 단면의 형상, 하중, 구속조건 등과 관련이 있으므로 구조적 특성이라고 말할 수 있다. 철근에 작용하는 국부적인 휨이나 전단응력이 생기면, 복잡한 삼축 응력상태가 발생하고, 철근과 콘크리트 사이의 기하학적인 모양에 따라서 인장 혹은 압축응력이 생기게 된다. 활렬이 생기거나, 콘크리트 덮개가 떨어져나가면, 다우웰효과가 감소하게 되고, 균열면을 기준으로 전단에 대한 팔길이가 작으면, 다우웰효과가 더 커진다. 간단한 경우는 균일한 간격의 균열이 서로 평행으로, 배근과 수직하게 형성된 경우이다. 이 경우 복합체로써 취급하여 강성행렬을 구성할 수 있다.

콘크리트에 묻혀있는 철근의 거동에 관한 연구가 많이 이루어졌는데, Vintzeleou-Tassios²⁶⁾, Soroushian²⁷⁾ 등이 그들이다. 콘크리트 덮개에 대한 다우웰거동은 Krefeld-Thurston²⁸⁾, Soroushian²⁹⁾, Jimenez-Perez³⁰⁾ 등에서 볼 수 있다. 그러나 지진하중 하에서의 골재연동이나 다우웰거동에 관한 연구는 아직 충분히 이루어져 있지 않다. 현재까지의 실험결과로 보면 이런 거동들에 의한 강도의 감소가 크지만, 모델들이 포함하는 영향 요소들의 값을 정하고 또한 방정식을 제대로 세우는 것이 쉽지 않다. 따라서 제한된 특성을 가진 여러 모델들을 조합하여 컴퓨터 프로그램을 만드는 데는 여러 사람의 공동노력이 필요할 것이다.

3. 철근콘크리트의 유한요소 모델링

일반적으로 복합재료를 유한요소 모델링할 경우에는 하나의 균질한 재료로 보고, 각각의 특성치 대신에 하나의 등가치를 사용한다. 무근 콘크리트의 경우가 골재와 시멘트풀의 복합재료로 여기에 해당한다고 할 수 있다. 철근 콘크리트의 경우는 철근과 콘크리트의 재료적 성질이 많이 다르므로, 철근이 균일하게 배근된 경우가 아니면 철근 콘크리트를 하나의 재료로 모델링하는

것은 드물었다. 두 재료를 따로 모델링하는 것이 유한요소법과 잘 어울리는 방법이기 는 하지만, 각각의 재료적 특성의 합이 복합체로서의 일체 거동특성과 일치한다는 가정이 성립하는 경우에만 적용할 수 있다.

개별적인 재료로 모델링할 경우에는 콘크리트와 철근, 그리고 이 두 재료의 부착, 경계면에서의 거동 등을 전부 조합해야 하며, 이 경우 상당히 복잡한 모델링이 된다. 이차원 혹은 삼차원 콘크리트 요소, 그리고 철근요소로 트러스요소같은 것이 사용된다. 또한 부착을 모델링하기 위해서는 철근요소와 콘크리트요소를 잇는 요소를 따로 사용하게 된다. 이때 콘크리트의 균열을 모델링하기 위해서는 서로 접한 콘크리트요소들을 분리한 후, 그 사이에 접촉요소나 균열연결요소를 넣는다.

개별균열(discrete crack)로의 접근방법은 균열 경계면에서의 전단거동을 예측하고 균열의 간격을 직접 측정할 수 있는 이점이 있으나, 균열이 생성되는 위치가 정해져 있는 것이 아니기 때문에, 균열이 형성되면 유한요소망을 다시 구성해야 한다거나 자유도를 증가시켜야 하는 등 수치해석적인 어려움이 있다. 지금까지 개별균열로의 접근방법은 단조하중을 받는 이차원 거동에서 주로 적용되어왔으며, 3차원 반복하중이 가해지는 경우로 확대 적용하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 비록 반복하중 하에서 각 요소의 개별거동이 잘 규명되어있다 할 지라도, 반복하중 하에서 존재하는 특수한 경우들, 즉, 균열이 다시 닫히는 경우, 또 다른 균열이 제2의 방향으로 생기는 경우, 그리고 균열이 다시 열리는 경우 등에 대한 해결방법이 제시되어야 한다.

지금까지 설명한 개별적인 요소를 이용하여 철근 콘크리트 구조물을 모델링하여 극한강도까지 혹은 그 이후의 거동, 반복하중이 가해지는 상황에서 제대로 예측하는 것은 어렵다. 또한 좋은 방법이 있다 하더라도 실제 철근 콘크리트 구조물에 적용할 때는 많은 컴퓨터 계산시간과 기억용량 때문에 제약을 받게 된다. 이러한 이유로 최근에는 철근 콘크리트를 하나의 복합재료로서 일

체로 보는 연구가 진행되고 있다. 이 경우 철근 콘크리트를 하나의 연속체로 취급하고, 각 재료의 거동과 상호작용을 합하여 하나의 통합된 거동조건을 사용하게 된다. 그러나 각 재료거동의 합이 복합체로서의 전체적인 거동과 잘 일치하지 않는데, 이것은 철근과 콘크리트의 상호작용이 매우 크고 복잡한 양상을 띠기 때문에, 실제 철근 콘크리트 부재는 단순히 각 재료의 거동을 중첩시키는 방법으로는 제대로 설명할 수 없기 때문이다.

철근 콘크리트의 비선형 유한요소 모델링 방법에서 각기 재료를 따로 분리한 접근방법에 대해서 먼저 알아보고, 그리고 매크로요소 (macrolevel element)를 이용한 접근방법에 대해서도 알아본다.

3.1 배근의 유한요소 모델링 방법과 콘크리트와의 상호작용

각 철근을 개별 모델링하기 위해서 일차원 트러스요소를 사용한다. 이 요소는 일반적으로 절점이 두 개이지만 고차원 (higher order) 콘크리트요소를 사용하는 경우에는 변위 적합조건을 고려하여, 3절점 일차원 요소를 사용하기도 한다. 보에서 스티럽이 조밀하게 배근된 경우처럼 철근이 균일하게 들어있는 경우는 이차원이나 삼차원 요소로 모델링하고 콘크리트요소와 절점을 맞추어 중첩한다. 이러한 분포보강 (smeared reinforcement) 요소는 철근이 한 개일 경우에 적합한 일차원적인 요소들과 함께 사용될 수 있다. 만약 전체 거동이 중요하다면 철근과 콘크리트요소의 절점 자유도를 일치시키는 것이 두 재료의 상호작용 - 부착 및 활동, 다우웰거동 - 을 더 잘 모델링 할 수 있을 것이다. 철근 혹은 콘크리트 요소에서 인장보강 (tension stiffening) 효과를 고려하면 상호작용의 영향을 요소에 포함시킬 수 있다. 만일 이러한 상호작용을 구체적으로 계산해야 하는 경우에는 철근과 콘크리트를 연결하는 각 요소절점의 자유도를 다르게 하고, 그 사이에 특별한 접촉요소 (contact element)를 넣는다. 이러한 접촉요소는 철근을 따로 다룰 때에만 사용할 수 있고, 통합적으로 나타낼 경우에는 사용할

수 없다.

이러한 접촉요소의 한 형태로 부착연결 (bond link) 요소를 들 수 있다. 부착연결요소에서는 하나의 콘크리트 절점과 하나의 철근 절점을 연결시키는데, 두 개의 비선형요소를 넣어서 하나는 철근의 배치방향으로 두어서 부착-활동을 나타내고, 다른 하나는 그것에 직각으로 배치하여 다우웰거동을 모델링한다. 이 경우, 트러스요소의 일방향 구성조건 만을 사용하여 부착-활동과 다우웰거동을 모델링할 수 있다. 연결 절점에 작용하는 응력의 집중을 막고, 또한 철근과 콘크리트의 상호작용을 보다 정확하게 하기 위해서는 연속 접촉요소들을 사용하기도 한다^{30)~32)}. 이 경우 요소들을 철근과 콘크리트의 전 경계면을 따라 배치하게 된다.

일반적으로 많이 사용되는 비선형 유한요소 해석 프로그램은 대부분 철근 콘크리트 부재의 모델링과 금속의 소성변형, 암석 및 고무재료의 모델링도 같이 해석할 수 있게 되어있는데, 부착연결요소나 연속접촉요소를 따로 가지고 있지 않다³³⁾. 따라서 이러한 프로그램에서 콘크리트와 철근 사이의 부착효과는 인장보강효과를 이용함으로써 가능하다. ADINA에는 접촉요소가 포함되어있다^{31), 32)}.

3.2 콘크리트 요소의 모델링

3.2.1 압축과 인장의 모델링

적절한 모델링을 위해서는 압축을 주로 받는 부분과 인장을 주로 받는 부분에 대해서 따로 모델을 적용하는 것이 바람직하다. 이러한 일반화 및 기능의 구분 없이는 해석하는데 어려움이 있을 것이다. 예를 들면 구조물의 한 곳에서는 콘크리트 인장균열이 발생하고 다른 부분에서는 비선형 압축파괴가 일어난다든지 하는 경우에는 해석하기가 어려울 것이다. 초기의 ABAQUS 프로그램에서는 파괴면이 Chen-Chen 모델을 따랐으나, 최근에는 더 단순한 Drucker-Prager 모델을 사용하고 있으며, ADINA 프로그램에서는 사용자가 정의하게 되어있다.

반복하중 하에서는 미분형태 (differential or rate type)의 구성조건을 사용해야 한다. 비선형

탄성이론에 근거한 시컨트형태 (total or secant type)의 구성모델은 하중경로에 무관하기 때문에 부적절하다. 미분형태의 모델에서도 전체 응력벡터를 구할 때에 적분구간을 작게 하지 않으면 오차가 누적된다. 범용의 삼차원 비선형 유한요소해석에서의 콘크리트의 압축 구성모델은 간단하고, 수치적으로 안정되어있고, 이론적으로 옳으며, 또한 실험에서 얻은 주요 현상들을 설명할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 모델로는 ADINA에서 사용하는 아탄성직교이방성모델 (hypoeastic orthotropic model)이나, ABAQUS에서 사용하는 조합소성모델 (associated plasticity model) 등을 들 수 있다³³⁾.

3. 2. 2 균열을 처리하는 방법

개별균열적인 접근방법에서는 두개의 인접한 콘크리트 요소에서 응력을 검토하여 균열 발생조건을 만족하게 되면 요소가 인접한 변을 따라서 균열을 넣는다. 이러한 접근방법에서는 전체강성이 더 높게 나온다. 최근에는 균열의 생성위치와 방향이 기존요소와 상관없이 새로운 요소를 형성하고 절점을 새로운 위치에 보낼 수 있는 연구가 진행되어 왔다³⁴⁾. MICRO 등이 이러한 개별적인 균열을 이차원에서 모델링할 수 있는 프로그램이다³⁴⁾.

조밀하게 배근된 전단벽에서 균열이 고르게 생기는 경우에는 분포균열적인 접근이 실제거동에 더 적합할 것이다. 이 경우에 국부적인 균열을 콘크리트 요소전체에 걸쳐 영향을 미치는 것으로 평균화시킨다. 균열이 발생하게 되면 콘크리트의 접선특성매트릭스만을 수정하고 유한요소구성 자체를 변화시키지는 않는다. 이것은 균열의 방향에 대한 제한이 없기 때문에, 균열의 개별적인 거동보다는 구조물의 전체적인 거동이 더 중요할 때에는 좋은 것으로 받아들여지고 있다. ABAQUS에서는 사용자가 인장 하에서의 구간선형인 응력-변형도 곡선 및 최종변형률을 입력하게 되어 있다. ADINA에서는 선형 응력-변형도 관계를 콘크리트 연화구간에서만 입력하게 되어있다. ADINA와 ABAQUS 둘 다 최고응력 이후의 곡선에서 하중이 반복적으로 가해질 경우엔 원점으로부

터 바로 전에 작용한 최고 변형점까지를 직선으로 연결한 선을 이용하게 되어있다. 이 두 프로그램 모두 콘크리트와 철근의 부착-활동을 모델링하기 위한 부착연결요소나 접촉요소를 포함하고 있지 않고, 또한 철근의 인장부분은 선형거동을 채택하고 있기 때문에 인장보강효과를 고려할 수 없다. 따라서 인장보강효과의 영향을 고려하려면 콘크리트의 인장거동 곡선에서 최종변형률을 많이 조정해야 한다.

3. 2. 3 분포균열에서의 부착-활동

앞에서 부착연결요소나 접촉요소를 이용해서 철근과 콘크리트의 부착-활동효과를 모델링하는 방법에 대해서 알아보았다. 이러한 방법은 개별균열적인 접근에서 사용가능하며, 이 경우 부착의 변화, 그리고 균열들 사이의 철근과 콘크리트의 응력 등을 계산할 수 있다. 분포균열에서는 각 균열의 위치를 계산할 수 없고 또한 균열사이의 국부적인 변화를 계산할 수 없기 때문에 부착, 응력의 경향만을 알 수 있다. 분포균열에서는 철근과 콘크리트 사이에서 완전부착을 가정 한 후, 부착-활동 효과는 철근과 콘크리트의 재료 거동곡선을 실험결과를 토대로 수정함으로써 그 효과를 고려하는 것이 더 바람직하다. 이렇게 함으로써, 프로그램에서 자유도를 크게 줄일 수 있고, 또한 앞에서 언급한 부착연결요소나 접촉요소를 따로 개발할 필요가 없다. 철근과 콘크리트의 거동은 인장보강효과를 적절하게 포함시킴으로써 수정될 수 있다.

인장을 받는 철근 콘크리트 부재에서 균열이 발생하면, 균열면에서의 콘크리트의 응력은 영이고, 철근의 응력은 최고값을 보인다. 부착으로 인한 응력의 전달로 콘크리트 내의 인장응력은 두 균열 사이에서 최대값을 보인다. 즉, 콘크리트 내의 평균응력치는 영이 아니다. 또한 콘크리트가 인장응력을 분담하기 때문에 철근의 응력은 균열로부터 멀어질수록 점점 줄어들게 된다. 힘의 평형조건에 의해서 어떤 단면에서의 철근의 응력은 균열위치에서의 철근의 응력에서 콘크리트의 응력을 뺀 후 철근비로 나누면 된다. 평균

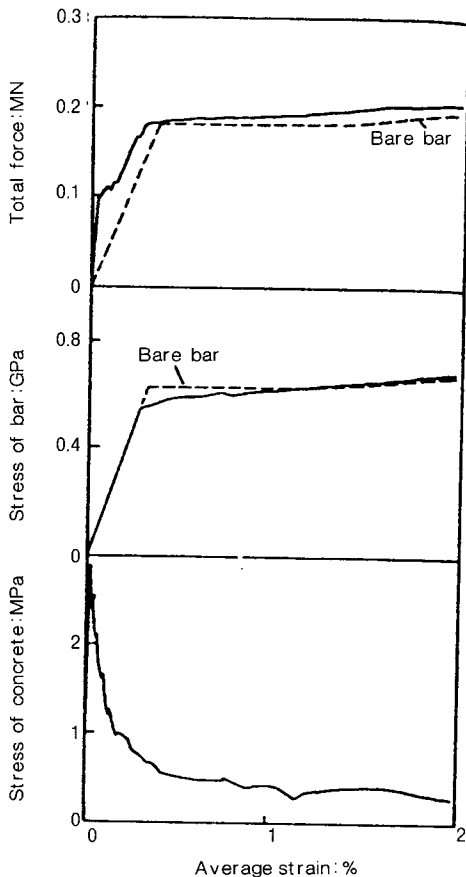


그림 7 콘크리트 인장실험에서의 인장보강 효과

축변형률은 두 균열사이의 철근변형률의 평균값이며, 이 값은 균열면에서의 철근의 변형률보다 훨씬 작은 값이다. 사실 철근의 항복은 균열이 발생한 위치 및 그 근처에서만 일어난다. 균열과 좀 떨어진 위치에서는 부착 때문에 철근의 응력과 변형률이 항복점보다 작지만, 균열이 발생한 위치에서는 항복에 도달하면 철근은 바로 변형경화에 도달한다. 평균 축변형률이 철근의 최고 변형률보다 훨씬 작기 때문에 철근의 응력과 평균 축응력과의 관계를 나타낸 곡선이 순수 철근의 응력-변형률 곡선보다 위쪽에 있다. 반면에, 철근을 따라서 켜 철근의 평균응력과 평균변형률사이의 관계 곡선은 그 곡선의 아래쪽에 위치한다. 마지막으로 부재를 따라서 켜 콘크리트의 평

균응력과 평균변형률의 관계곡선은 긴 꼬리를 형성한다. 이 곡선은 인장하에서의 무근 콘크리트보다 훨씬 크고 또한 뒤로 훨씬 길다. 이러한 모든 효과를 인장보강이라 일컫는다. 이 용어는 균열과 균열사이에서 철근과 콘크리트의 부착 때문에 철근이 더 강해지는데 연유한다. 철근비가 낮을수록 인장보강효과는 더 커지고, 철근 콘크리트 부재의 균열 후 변형에 더 많은 영향을 미치게 된다³⁴⁾.

3.3 이차원에서 균일하게 보강된 철근 콘크리트 부재의 복합체로의 모델링

이미 언급한 바와 같이, 균일하게 보강된 철근 콘크리트 부재의 비선형 해석을 위해서 복합체로써의 철근 콘크리트요소가 연구되고 있다. 이 경우 각 철근과 균열의 영향은 유한요소 안에서 국부적으로 평균적인 영향으로 간주된다. 이렇게 할 경우, 계산도 더 간단하게 된다. 단지 새 요소에 해당하는 복합체로써의 거동식을 넣음으로써 기존의 유한요소 프로그램을 그대로 사용할 수 있으며, 특별한 부착연결요소를 콘크리트와 철근사이에 넣을 필요가 없고, 균열이 발생한 후에 유한요소망을 다시 바꿔야 할 필요도 없다. 지금까지 복합체적인 접근법은 판요소를 사용하여, 철근이 균일하게 보강된 경우에 한해서, 이차원 평면응력상태에서 단조하중 혹은 반복하중을 받는 경우에 비교적 잘 적용되어 왔다. 실험적인 연구도 이러한 모델링을 뒷받침하여 연구되어왔다. 이축 하중이 작용하는 경우는 일반적으로 하중이 서로 비례하지 않고, 인장 및 압축력이 배근과 평행하지도 않다. 전체적인 거동은 각 방향 재료의 거동을 조정함으로써 나타내어야 한다. 인장보강효과는 철근과 콘크리트의 부착으로 인한 것인데, 이것은 철근의 응력-변형도 곡선을 조정하든지, 혹은 콘크리트의 인장하에서의 일축 응력-변형도 곡선에서 최고응력 이후의 곡선을 수정함으로써 그 영향을 고려할 수 있다. 2축 응력에서 횡방향 인장으로 인하여 종방향의 콘크리트 압축강도가 약해지는 것은 주응력 방향의 콘

크리트 일축응력-변형도 곡선을 수정함으로써 고려할 수 있다.

현재까지 매크로요소는 균열, 비선형거동 등이 비교적 균일하여 국소파괴가 심하지 않은 경우에 대해서 제한적으로 적용되고 있다. 철근이 균일하게 분포되어있는 벽체, 깊은 보에서 판요소 등을 사용하는 경우이다. 삼차원적인 철근-콘크리트 복합요소의 개발은 삼차원 상태에서의 철근콘크리트의 거동에 관한 실험적인 연구가 충분히 이루어진 후이나 가능하며, 이러한 기반없이 현재의 이차원적인 연구를 삼차원으로 확대하는 것은 좋은 결과를 기대하기 어렵다.

3.3.1 균열이 발생한 경우의 분포응력 및 변형률

분포응력 (smeared stress)은 철근과 균열이 생긴 콘크리트에 가해지는 총 하중을 해당 단면적으로 나누면 된다. 분포변형률 (smeared strain)은 전체 변형을 전체 길이로 나누면 된다. 따라서 이러한 분포응력 및 변형률은 균열 사이사이의 응력과 변형률의 변화를 나타낼 수 없다. 또한 부착-활동으로 인한 콘크리트와 철근의 변형의 차이도 나타낼 수 없다. 특성행렬은 다음과 같이 나타내질 수 있다.

$$D' = T_c^T D_c T_c + \sum_i \rho_i T_{si}^T D_{si} T_{si}$$

여기에서 D' 는 전체좌표계에서의 접선허성행렬이고, D_c 는 콘크리트 그리고 D_{si} 는 철근의 접선허성행렬이다. T_c , T_{si} 는 변환행렬이다. ρ_i 는 철근비를 나타낸다. D_{si} 는 x 축이 배근 방향과 평행인 국부좌표계에 대한 값이다. 만일 전체 인장보강 효과가 콘크리트의 인장거동곡선에 포함되었다면, 철근의 응력-변형도 값은 순 철근의 거동곡선보다 작은 값을 사용해야 한다. 만일 그 효과가 철근에 포함되었다면, 철근의 거동곡선은 반대로 더 커져야 한다.

3.3.2 횡방향 인장이 존재할 경우에 있어서 응력-변형률 및 강도

국부적으로는 평균응력과는 달리, 균열사이의

콘크리트에서의 부착에 의한 인장응력은 인장-압축의 사분면에서 이축응력 상태를 형성한다. 이 곳에서는 이축응력을 받는 무근콘크리트의 강도포락선에서의 압축강도가 일축 응력하에서의 압축강도보다 더 낮으므로, 콘크리트의 극한강도는 더 낮아지게 된다. 더군다나 균열로 인해 형성되는 콘크리트 띠는 상대적으로 가늘어서 압축에 저항하는 힘이 약하다. 이러한 세장효과는 가느다란 철근이 사용되었을 때에 더 현저하게 나타난다. 최근에 압축-인장의 이축응력 하에서 균열이 생긴 철근 콘크리트의 강도를 측정하는 연구가 활발히 진행되어왔다^{35), 36)}. 유럽에서의 연구에 따르면, 횡방향 인장으로 인한 종방향의 압축강도 감소는 15%정도를 넘지 않는다.

참 고 문 헌

1. Reinhardt H. W. et al. "Tensile tests and failure analysis of concrete," *J. Struct Engng. Am-Soc. Civ. Engrs*, 112(11), 1986, pp. 2462-2477.
2. Hillerborg, A. et al. "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements," *Cement and Concrete Research*, 6, 1976, pp. 773-782.
3. Dougill J. W. "On stable progressively fracturing solids," *Z. Angew. Math. Phys.*, 27, 1976.
4. Bazant Z. P. and Kim S. S. "Plastic-fracturing theory for concrete," *J. EM, Am. Soc. Civ. Engrs*, 105, June 1979.
5. Lemaitre J. "Coupled elastoplasticity and damage constitutive equations," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 51, 1985.
6. Bazant Z. P. and Prat P. C. "Microplane model for brittle-plastic material part I and II," *J. EM, Am. Soc. Civ. Engrs*, 114, No. 10, 1988, pp. 1672-1702.
7. Comite Euro-International du Beton, Bond

- action and bond behavior of reinforcement. CEB, Paris, Dec. 1981, State of the art report, Bulletin d'Information 151.
8. ACI Committee 408. Bond under cyclic loading. State of the art report.
 9. Balazs G. L. Fatigue of bond. Paper accepted for publication by ACI Materials Journal, 88, No. 6, Nov.-Dec., 1991.
 10. Hawkins H. M. et al. Local bond strength of concrete for cyclic reversed loadings. Bond in Concrete. P. Bartos (ed.), Applied Science Publishers Ltd., London, 1982, pp. 151-161.
 11. Plaines P. et al. *Bond relaxation and bond-slip creep under monotonic and cyclic actions*. Bond in Concrete. P. Bartos (ed.), Applied Science Publishers Ltd., London, 1982, pp.193-205.
 12. Filippou F. C. "A simple model for reinforcing bar anchorages under cyclic excitations," *J. Struct. Engng., Am. Soc. Civ. Engrs*, 112, No. 7, July 1986.
 13. Pochanart S. and Harmon T. "Bond-slip model for generalized excitation including fatigue," *ACI Materials Journal*, Sept.-Oct. 1989, pp.465-476.
 14. Morita S. and Kaku T. Local bond stress-slip relationship under repeated loading. Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, *IABSE Symposium*, Lisbon, 1973, pp.221-227.
 15. Tassios T. P. Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions. *AICAP-CEB Symposium*, Structural Concrete Under Seismic Actions, Comite Euro-International du Beton, 1, Rome, 1979, Bulletin d'Information 131.
 16. Ciampi, V. et al "Analytical model for concrete anchorages of reinforced bars under generalized excitations," Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 82-83, University of California, Berkeley, Nov. 1982.
 17. Viwathanatepa S. et al. "Effects of generalized loadings on bond of reinforcing bars embedded in confined concrete blocks," Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-79/22, Aug. 1979.
 18. Fardis M. N. and Buyukozturk O. "Shear transfer model for reinforced concrete," *J. EM, Am Soc. Civ. Engrs*, 105, No. EM2, Apr. 1979, pp.255-275.
 19. Bazant Z. P. and Gambarova P. G. "Rough cracks in reinforced concrete," *J. Struct. Div., Am.Soc. Civ. Engrs*, 106, NO. ST4, Apr. 1980, pp.819-842.
 20. Walraven J. C. "Fundamental analysis of aggregate interlock," *Journal of the Structural Division, Am. Soc. Civ. Engrs*, 107, No. ST11, Nov. 1981, pp.2245-2270.
 21. Li B. and Maekawa K. Contact density model for cracks in concrete. Computational Mechanics of Concrete Structures: Advances and Applications, Transactions of IABSE Colloquium Delft 87. Delft, Aug. 1987.5 1-62.
 22. Isenberg J. and Adham S. "Analysis of orthotropic reinforced concrete structures," *J. Struct. Div., Am. Soc. Civ. Engrs*, 96, No. ST12, Dec. 1970, pp.2607-2623.
 23. Duchon N. B. "Analysis of reinforced concrete membranes subject to tension and shear," *ACI Journal*, 69, No. 9, Sept. 1972. pp.578-583.
 24. Collins M. P. "Towards a rational theory for reinforced concrete members in shear," *J. Struct. Div., Am. Soc. Civ. Engrs*, 104,

- No. ST4, Apr. 1978, pp.649-666.
25. Perdikaris P. C. and White R. N. "Shear modulus of precracked R/C panels," *J. Struct. Engng, Am. Soc. Civil. Engrs*, 111, No. 2, Feb. 1985, pp.270-289.
 26. Vintzeleou E. N. and Tassios T. P. "Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions," *Mag. Conc. Res.*, 38, No. 134, Mar. 1986, pp.13-22.
 27. Soroushian P. et al. "Analysis of dowel bars acting against concrete core," *ACI Journal*, 83, No. 59, July-Aug. 1986, pp. 642-649.
 28. Krefeld W. J. and Thurston C. W. "Contribution of longitudinal steel to shear resistance of reinforced concrete beams," *ACI Journal*, 63, No. 14, Mar. 1966, pp.325-344.
 29. Soroushian P. et al. "Behavior of bars in dowel action against concrete cover," *ACI Structural Journal*, Technical Paper No. 84-S18, Mar.-Apr. 1987. pp.170-176.
 30. Jimenez-Perez R. et al. "Bond and dowel capacities of reinforced concrete," *ACI Journal*, Symposium, No. 76-4, Jan. 1979.
 31. Mehlhom G. et al. "Nonlinear contact problems - a finite element approach implemented in ADINA," *Computers and Structures*, 21, No. 1/2, 1985. pp.69-80.
 32. Mehlhom G. and Keuser M. "Isoparametric contact elements for analysis of reinforced concrete structures," *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*. Am. Soc. Civ. Engrs, 1986, pp.329-347.
 33. Bathe K.-J. et al. "Nonlinear analysis of concrete structures," *Computers and Structures*, 32, No. 3/4. 1989. pp.563-590.
 34. Gupta A. K. and Maestrini S. R. "Post-cracking behaviour of membrane reinforced concrete elements including tension-stiffening," *J. Struct. Engng, Am Soc. Civ. Engrs*, 115, No. 4, Apr. 1989, pp.957-976.
 35. Vecchio F. J. and Collins M. P. The response of reinforced concrete to inplane shear and normal stresses. Publ. No. 82-03. Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, Mar. 1982, p.332.
 36. Stevens N. J. et al. "Analytical modeling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loading," Res. Report, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, Jan. 1987, p.201. 