



RC 교각의 비선형 거동 해석을 위한 모델



김 익 현*

1. 서 론

우리 나라는 지진에 대한 안전지대라는 인식이 널리 퍼져 있었으나 역사지진과 최근 60년간의 주요 지진을 살펴보면 우리 나라도 결코 지진에 대해 안전지대가 아님을 확인 할 수 있다. 이웃나라 일본은 1995년 1월 17일에 발생한 효고현 남부 지진(고오베 지진)에 의해 인명뿐만 아니라 많은 사회 기반 시설물에 심각한 피해를 입었다. 이 지진을 계기로 우리 나라에서도 지진에 대한 경각심이 고조되고 있고 예상치 못한 지진에 대해 인명과 사회 기반시설을 보호하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 인적/물적 자원을 수송하는 기반 시설인 도로 및 철도의 교각의 내진성 확보 문제는 절대적이며 이를 위해서는 이들 구조물의 적절한 내진성 평가가 선행되어야 한다.

수치해석에 의한 교각구조의 내진성 평가는 설계 지진하중 하에서 구조체의 비선형 거동을 고려한 적절한 재료/구조 모델을 사용하여 지진 응답

을 검토함으로써 평가할 수 있으나 정적 수평력 재하 상태에서의 강도 및 연성도 등을 평가함으로써 개략적인 내진성을 평가할 수 있다.

본 기사에서는 교각의 비선형 거동 특성을 수치해석을 통해 적절하게 모사하기 위한 재료 구성 모델 및 구조 모델에 대해 기술한다.

2. 수치 해석 모델

2.1 역학적 모델

수치해석에 의한 구조체의 강도 및 파괴 패턴을 예측, 평가하기 위해서는 적절한 재료/역학적(material/mechanical) 모델 하에서 수치해석이 수행되어야 한다.

역학적 모델(mechanical model) 중 가장 간편하고 전형적인 모델은 프레임 모델이라고 할 수 있다. 이 모델은 병진/회전 자유도가 변수로 부과되는 절점과 이들 절점을 연결하는 부재 축으로 구성된다. 이 모델과 관련하여 주어지는 재료

* 서울대학교 지진공학연구센터, 연구원, 공학박사

모델은 전단력과 변위 및 휨과 회전각의 관계식으로 주어지는 것이 일반적이다. 이렇게 거시적인 재료 모델을 이용하는 부재의 거동 특성은 절점으로 연결된 모든 부재에 대해 정의되게 된다. 동적 해석 시에는 각 부재의 질량을 등가의 집중 질량으로 각 절점에 분산 부과하여 수행할 수 있다. 이 모델은 간편하여 기둥 및 보로 연결된 프레임 구조체의 해석에는 상당히 적합한 모델이며 각 부재의 비선형 거동을 정의하면 구조계 전체의 비선형 거동을 예측할 수 있다.

일반적으로 구조체의 기하학적 형상이나 경계 조건에 구애됨이 없이 적용 가능한 모델은 3차원 유한요소 해석법이다. 이 경우 어떤 형태의 재료 모델도 적용 가능하며 질량도 일관성 있게 공간상에 분포되게 된다. 3차원적인 응력-변형도 특성이 있는 그대로 모델화 될 수 있고 구조체 전체의 거동 응답과 관련한 상세한 모든 정보가 제공된다. 즉, 각 요소의 응력 및 변형도, 균열의 발생, 균열의 발생에 따른 비탄성 변형, 소성상태, 재료의 데미지, 절점 변위, 속도, 가속도 등이 계산 가능하다. 전단파괴인 경우는 부재 축에 경사지게 발전하는 불안정한 균열로 판단 가능하다. 이 모델에서는 부재의 크기에 따른 전단 강도의 저하를 나타내는 크기 효과(size effect)도 자동적으로 고려할 수 있다.

만약 응력과 변형도가 평면 상태로 유지되는 제한적인 경우라면 평면 구성모델을 이용하여도 상당한 정도로 구조체의 거동을 모사할 수 있게 된다. 지하철과 같은 박스 형태의 구조물은 적당한 2차원의 구조모델로 변경하는 것이 가능하다. 따라서 완전한 3차원 입체 요소로 모델화할 때와 비교해 엄청나게 자유도를 줄일 수 있어 계산효율을 증대시킬 수 있다.

사실, 구조체의 적절한 비선형 거동 예측은 해석에 이용되는 재료 모델의 정확성과 신뢰성에 의존한다고 해도 과언이 아니다. 왜 수많은 구성 모델이 제안되고 있는가가 여기서 기인하는 것이다. 그러나 현실은 이들 중 극히 일부가 설계된 구조물의 비선형 거동을 예측하는데 적용되고 있을 뿐이다. 아래에 기술한 재료 모델은 RC구조

체의 비선형 특성을 정도 있게 모사할 수 있는 재료 모델의 한 예이다.

2.2 RC 구성방정식

RC의 구성모델은 콘크리트와 철근의 구성방정식으로 구성된다. 이들 구성방정식은 상정 볼륨(control volume)내에서 하중의 전달 경로에 종속(path-dependent)인 평균응력과 평균변형도의 관계식으로 주어진다.

콘크리트의 구성방정식은 작용 응력의 상태에 따라 압축, 인장, 전단 구성식으로 구성되며 구성방정식은 균열의 포함 유무에 따라 별개의 식이 적용된다. 균열이 발생하기 이전에는 탄소성 파괴 모델(elasto-plastic fracture model)이 적용된다. 이 모델에서 콘크리트의 거동은 영구 변형과 에너지 흡수능력의 손실을 나타내는 소성(plasticity)과 파괴(fracture)로 표현된다¹⁾. 일단 균열이 발생하면 구성방정식은 탄소성파괴 모델에서 3차원 분산 균열 모델로 전환된다. 이때 구성방정식은 균열 발생에 따른 응력의 소산으로 3차원적인 구속(confinement)효과가 무시할 만큼 작아지기 때문에 평면에서 정의된 구성방정식의 적용이 가능하다. 즉, 그림 1과 같이 3차원 공간상의 응력은 균열이 투영된 3개의 상호 직교 평면상으로 해체할 수 있다. 따라서 2차원 구성방정식을 이용해 각각의 평면에서 응력을 계산하고 이를 재결합하여 구할 수 있다.

인장 구성방정식은 인장경화(tension stiffening) 모델을 적용한다. 충분한 철근비를 가진 RC부재에

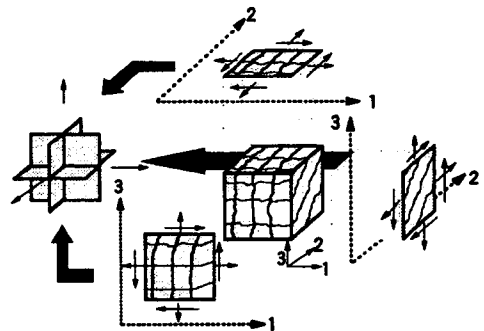


그림 1 3차원 균열 입체요소의 평면 분할

일축 인장력을 가하면 부재의 평균 인장응력은 균열 발생 후에도 즉시 "영"으로 떨어지지 않는다. 이는 균열 발생 면에서의 철근의 인장응력이 여전히 항복점 이하여서 철근과 이를 에워싼 콘크리트의 부착특성에 의해 작용 하중을 균열이 발생하지 않은 이웃 단면으로 전달하기 때문이다. 식 (1)은 평균 인장응력과 평균 변형도의 관계식이다²⁾.

$$\sigma_t = \sigma_t(\epsilon_t; c) = f_t \left(\frac{\epsilon_{tw}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (1)$$

여기서, σ_t 는 균열에 수직인 평균 인장응력, f_t 는 콘크리트의 인장강도, ϵ_t 는 균열에 수직인 인장 변형도, ϵ_{tw} 는 콘크리트의 균열 시의 인장변형도, c 는 경화계수이다.

경화 계수는 부착특성에 의해 결정되며 콘크리트와 일반 이형철근에서는 일반적으로 0.4가 이용되고 있다²⁾(그림 2).

전단 구성식은 접촉밀도 함수를 가정한 모델(contact density model)³⁾을 채용한다. 관계식은 균열 면에서의 탄성 변형 성분과 균열의 폭을 무시하여 유도될 수 있다. 전단 응력은 균열의 폭과 무관하게 균열 폭에 대한 전단변형의 비로 주어진다. RC에서의 전단강도는 일반적으로 균열 면에서의 강도에 크게 의존하지만 사이클릭 하중 재하시 균열의 폐합에 의해 전단강도가 크게 증

가하는 경향을 보이게 된다. 따라서, 전단강도 식에는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단강도가 포함된다.

$$\tau = G \times \gamma \quad (2)$$

$$G = \frac{1}{1/G_{st} + 1/G_c} \quad (3)$$

$$G_{st} = \frac{\tau_{st}}{\gamma} = f_{st} \frac{\beta}{1 + \beta^2} \quad (4)$$

$$\beta = 2 \frac{\gamma}{\epsilon_t} \quad (5)$$

여기서, τ 는 평균전단응력, γ 는 평균 전단변형도, G 는 전단 썬크트 강성, G_c 는 비균열 콘크리트의 전단강성, G_{st} 는 균열 콘크리트의 전단강성, β 는 전단변형도 대 인장변형도의 비이다.

각 인장변형도에 대한 전단응력-변형도의 관계식은 그림 3과 같다.

콘크리트 내에서의 철근의 거동특성은 철근 자체만의 거동특성과 달리 철근 및 부착특성에 따라 달라진다. 균열이 발생한 콘크리트 부재 내에서 철근에 작용하는 인장응력은 동일하지 않고 콘크리트가 인장력을 부담하지 못하는 균열 면에서의 응력이 최대가 된다. 균열 면에서의 철근응력이 항복점 이하이면 철근의 응력과 변형의 관계식이 탄성이어서 콘크리트 내의 철근의 구성식

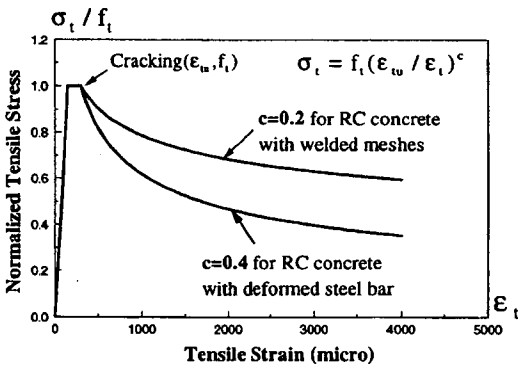


그림 2 RC의 인장 경화 모델

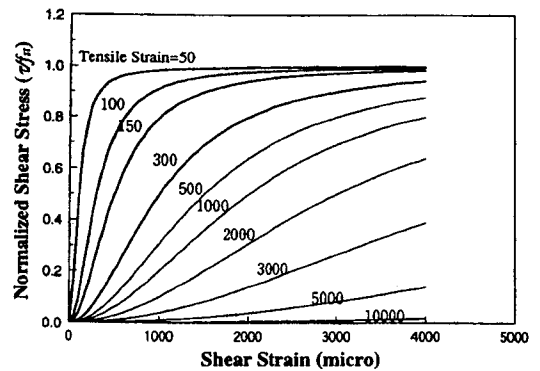


그림 3 RC의 전단 모델

은 철근 자체의 구성식과 동일하다. 일단, 균열면에서의 철근이 항복하기 시작하면 철근의 탄성 평균응력-변형도의 관계식을 잃게 된다. 이때 철근의 평균 인장응력은 철근 자체의 항복점보다 낮아진다. 하중의 제하 및 재재하에 대해서는 가토 모델⁴⁾ (Kato, B. 1979)을 채용하면 바우징거 효과 및 변형 경화가 정도 높게 모사된다.

2.3 무근 콘크리트의 구성 방정식

2.3.1 인장 연화 모델

RC와 달리 무근 콘크리트의 경우 부착응력 특성이 없어 균열 발생 후의 응력은 급격하게 감소하게 된다. 이런 인장 연화(tension softening) 특성은 파괴 에너지(fracture energy)를 사용하여 특성화할 수 있다. 균열밴드(crack band)의 단위 전단당 소모 에너지인 파괴 에너지는 간략하게 식(6)과 같이 표현할 수 있다⁵⁾.

$$G_f = w_c \int \sigma_t d\epsilon_t \quad (6)$$

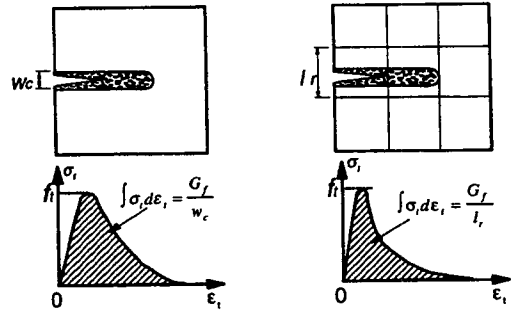
여기서, σ_t , ϵ_t 는 균열의 연직 방향의 평균 응력 및 변형도, G_f 는 파괴 에너지, w_c 는 균열의 폭이다.

파괴 에너지는 많은 실험을 통해서 최대 골재 크기와 큰 상관 관계가 있는 재료의 성질이라는 사실이 알려져 있다. 따라서, 재료의 성질이 주어지면 결정되게 된다. 이 파괴 에너지의 개념은 균열의 폭을 대신하는 요소의 대표크기(reference size)를 도입하여 근사적으로 분산균열 모델을 이용한 FEM에 적용할 수 있다(그림 4).

이런 파괴에너지를 만족시키는 인장응력-변형도의 관계식은 여러 형태로 고려할 수 있지만 RC의 인장 경화 계수를 조정하여 특성화 할 수 있다. 그림 5는 각기 다른 요소의 크기에 따라 파괴 에너지를 만족시키는 대응 경화 계수, c 를 나타낸다.

2.3.2 전단 연화 모델

인장 연화에서와 같이 전단 연화(shear softening)의 경우도 콘크리트는 전단 전달 능력을 상실하여 파괴 및 연화 현상을 보이게 될 것이다. 골재의 맞물림 작용(interlocking action)은



(a) Real stress-strain curve based on w_c (b) Modified stress-strain curve based on l_r

그림 4 인장 연화 모델의 FEM 적용

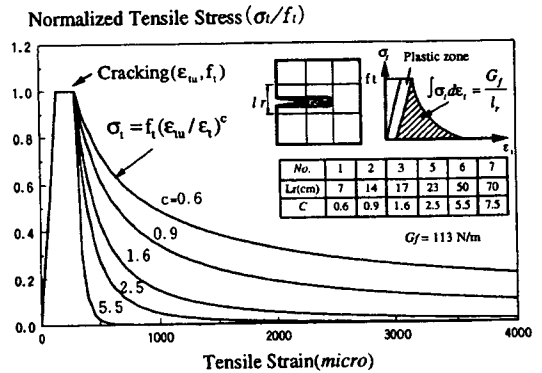
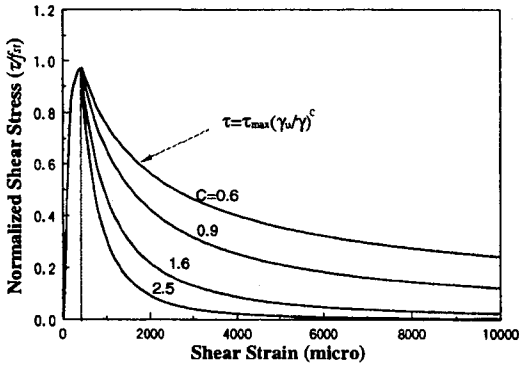


그림 5 인장 연화 모델 곡선

균열 폭이 증가하면 줄어들게 된다. 따라서 이런 연화 현상은 균열에 연직인 방향의 변형도의 증가에 따라 전단강성을 감소시켜 얻을 수 있다. 콘크리트의 균열을 가로질러 응력의 전달 메커니즘을 연구한 기존 연구에 의하면 전단의 연화는 균열 폭 뿐만 아니라 균열을 따라 발생한 전단면 위의 함수임을 알 수 있다⁶⁾. 본 기사에서는 Bujadham 모델과 유사한 간단한 연화 모델을 소개한다. 즉, 전단응력이 최대치에 도달하면 연화현상이 시작된다. 인장연화와 유사하게 전단의 경우도 파괴 에너지에 근거해 에너지 소산율이 고려되어야 하나 아직 이 분야에 대한 연구는 충분하지 않은 실정이다. 여기서는 인장연화에 적용한 동일한 에너지 소산율을 적용하기로 한다(그



(a) Tensile strain=0.00005, ultimate shear strain $\gamma_u=0.0004$

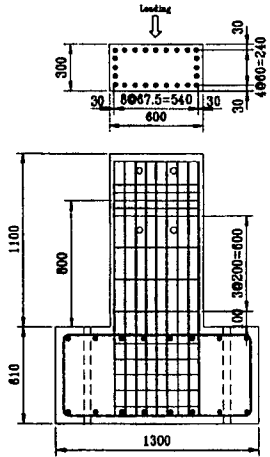
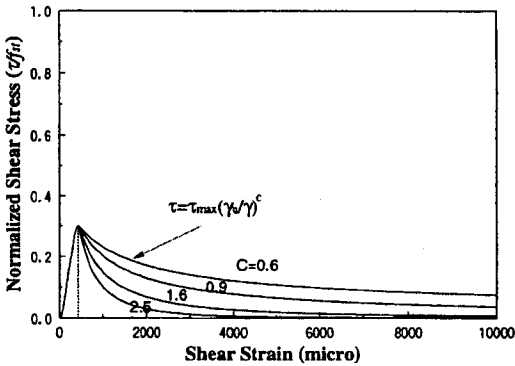


그림 7 교각 시험체



(b) Tensile strain=0.00005, ultimate shear strain $\gamma_u=0.0004$

그림 6 전단 연화 모델

각의 경우는 큰 단면의 둘레에 철근이 집중되어 배근된다. 따라서 단면 전체를 철근과 콘크리트의 부착응력에 의해 균열이 지배되는 철근 콘크리트의 영역(RC Zone)으로 간주하기는 곤란하다. 이런 영역화(Zonation) 문제와 관련한 공학적 시도가 제시되었긴 하였지만 아직도 미흡한 상황이다. 실험결과와 수치해석을 비교하였다(그림 8).

실험에서는 수치 해석에서 보이는 균열 이전의 초기 강성이 잘 나타나지 않고 균열 이후의 강성과 유사한 강성이 재하 초기 단계에서부터 보이고 있다. 수치 해석의 경우는 교각의 기초 부분을 제외한 기둥부분만 모델링 하였으며 이때 하부의 절점은 완전고정으로 하여 해석이 수행되었

림 6).

상기에 기술한 별개의 인장/전단의 구성식을 무근과 철근 콘크리트 영역에 적절하게 적용하여 RC보의 전단파괴 메카니즘을 수치적으로 해석할 수 있음을 보여주는 연구가 있다⁷⁾.

3. 비선형 거동해석

3.1 3차원 해석

RC 교각의 비선형 거동 해석을 위해 내하력 실험이 수행되었다(그림 7). 비교적 철근이 콘크리트 내에 등분포로 배근된 전단벽과는 달리 교

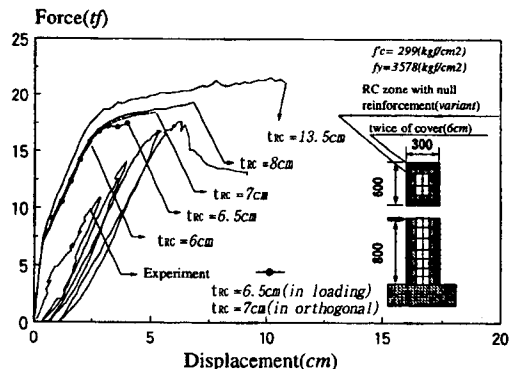


그림 8 3차원 수치해석과 실험결과 비교

다. 실제의 시험체의 제작은 먼저 기초부분을 타설하고 양생 후 기둥부분을 타설하므로 이미 재하 전에 이들 경계 면에서의 분리는 있었을 것으로 사료되며 이의 영향으로 결보기 초기 강성은 수치 해석의 균열 후의 강성과 유사하게 나온 것으로 사료된다. 그림 8에서 알 수 있듯이 교각의 강도는 교각 단면의 영역화에 따라 변화가 있다. 즉, RC영역이 증가하면 균열에 따른 응력의 소산율이 저하되어 강도의 증가와 함께 보다 연성적인 거동을 보이게 된다.

3.2 2차원 해석

하중의 연직방향(out-of-plane)으로 각기 다른 영역을 설정할 수 있는 3차원 해석의 경우와 달리 2차원 해석의 경우는 이들 RC와 무근 영역이 혼재하여 요소의 성질이 균질하게 된다. 교각 단면 측면의 철근을 고려해 교각 단면을 전부 RC 영역으로 설정할 경우의 해석치를 3차원의 해석 결과와 비교하였다(그림 9).

2차원 해석 결과는 3차원 해석 결과와 상당한 차이를 보여주고 있다. 교각의 주철근 항복으로 인한 전체 강성이 급격히 저하되기 시작해 바로 전단파괴에 이르는 3차원 해석결과와 달리 2차원 해석의 경우는 강성 저하 후에도 저항력이 서서히 증가되어 충분한 연성을 발휘한 후 휨 파괴 거동 쪽으로 모사하고 있다. 이는 단면 전체에 걸쳐 측면 철근에 의해 균열이 제어된다고 가정

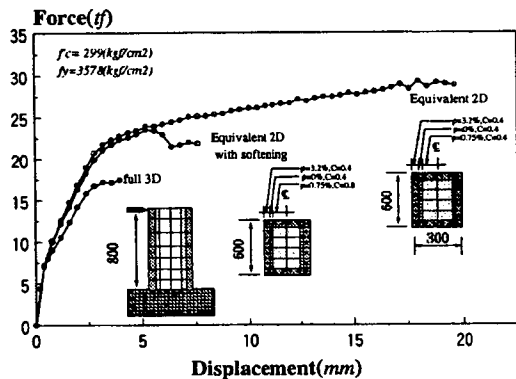


그림 9 2차원 및 3차원 해석결과의 비교

되고 있어 무근 영역에서 불안정하고 급격한 균열의 진전을 보이는 3차원 해석과는 달리 균열 발생 후의 인장/전단응력 소산이 상당량 제어되어 일어나는 현상이다. 따라서 교각과 같이 대단면에 철근이 일부 영역에 집중되어 배근된 구조체를 2차원 영역에서 해석하는 경우는 out-of-plane 방향의 비 균질한 특성을 대표할 수 있는 구성모델을 고려하지 않으면 강도 및 연성을 과대 평가할 우려가 있음을 알 수 있다.

4. 등가 인장/전단 연화 계수

4.1 등가 인장/전단 연화 계수

교각의 비선형 3차원 해석 결과를 2차원 해석에서 모사하기 위해서는 out-of-plane 방향의 각기 다른 철근, 무근 영역의 균열 후의 에너지 소산 특성을 대표하는 등가 연화 계수(Equivalent Softening Factor)를 도입하지 않으면 안된다. 그림 10은 단순한 평균에 의해 등가의 연화 계수를 산정하는 방법을 보여 주고 있다. 즉, 철근과 무근 영역에서 파괴 시까지의 총 에너지 소산량을 계산하고 영역의 크기를 고려해 평균치를 산출한다. 이 평균 에너지 소산량과 등가가 되도록 연화 계수 c 를 구하게 된다.

그림 9에 등가 연화계수를 이용한 해석 결과를 함께 보여 주고 있다(equivalent 2D with softening으로 표시). 2차원 해석 결과와는 달리 등가의 연화 계수를 고려하면 해석 결과가 크게 개선되는 것을 알 수 있다. 그러나 여전히 3차원 해석 결과와는 상당한 차이를 보여 주고 있다.

이는 파괴 시의 파괴면(critical section)에서의

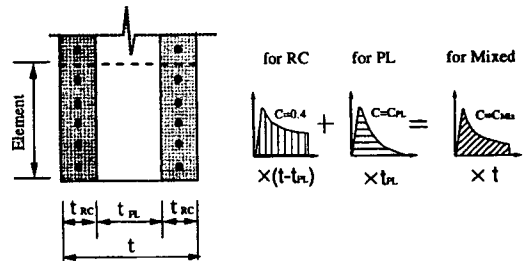


그림 10 간단한 등가 연화 계수의 계산방법

변형도 분포를 고려하면 해결할 수 있다. 그림 11는 파괴 면에서의 전단 응력의 분포를 나타낸다. 측면 철근의 영향으로 인한 큰 비선형 분포를 보여주고 있다.

각 하중 스텝에 대한 전단변형도의 진전 상황을 그림 12에 나타내었다. 하중(변위)이 작게 가해지면 철근 및 무근 영역에서의 변형도는 거의 일정하게 진전되는 것을 알 수 있다. 그러나, 하중이 일정 수준을 넘게되면 급격히 비선형성을 보여 철근으로부터 멀리 떨어진 무근 영역에서 파괴에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이런 현상은 하중에 대한 연직방향으로의 무근 영역의 크기가 커지면 심화되어 급격한 파괴가 일어나게 된다. 그림 12에서 주목할 사항은 부재가 파괴에 이를 시 철근영역에서의 변형도는 여전히 파괴에

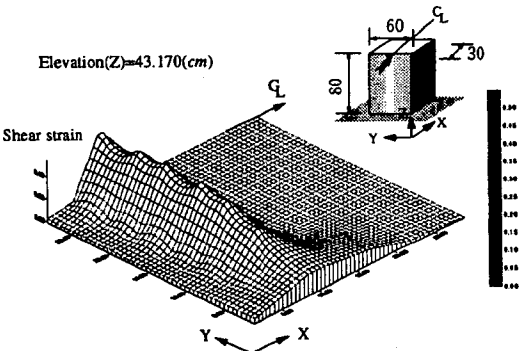


그림 11 파괴면의 전단 응력도 분포

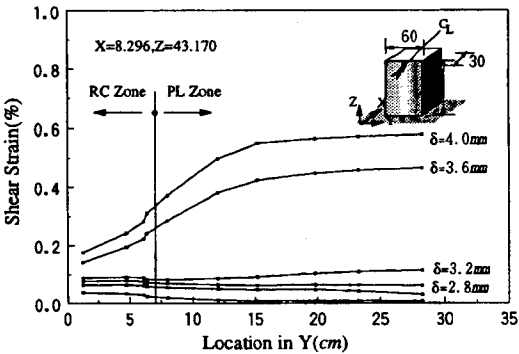


그림 12 각 하중 단계별 전단변형도의 발전 상황

이르는 변형도 수준보다 낮은 수준이다. 이는 등가 연화 계수를 산정시 철근영역에서의 에너지 소산량을 전부가 아닌 일부를 고려하지 않으면 실 구조체의 강도를 과대 평가할 수 있음을 시사한다. 그림 13는 무근 영역의 크기에 따라 연화 계수 계산 시 고려해야할 RC영역의 에너지 소산량의 비를 보여 주고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 무근 영역의 크기가 커지면 연화계수 산정에 공헌하는 철근 영역의 에너지 소산량이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다.

4.2 등가 연화계수를 고려한 2차원 해석

변형도의 비선형성을 고려하지 않고 계산한 연화계수, c 는 0.8이다. 비선형성을 고려하면 1.3이 된다. 순수 무근 콘크리트의 연화 계수는 요소의 크기에 의존하지만 대략 2.0을 이용해도 공학적으로 큰 문제는 없는 듯하다. 따라서 변형도의 비선형적 분포 특성을 고려하면 철근영역과 무근영역이 혼재하는 요소의 성질은 점차 무근의 연화 특성에 가까워지게 된다.

그림 14는 변형도의 비선형성을 고려하여 수행한 2차원 수치해석의 결과($c=1.3$ 일 때) 및 3차원 해석 결과와 변형도 비선형 분포를 고려하지 않았을 때의 해석 결과($c=0.8$ 일 때)를 비교한 것이다. 해석의 결과는 3차원 해석 결과와 매우 유사하며 변형도의 비선형 분포를 적절히 고려한 등가 인장/전단 연화 계수를 이용하면 교각

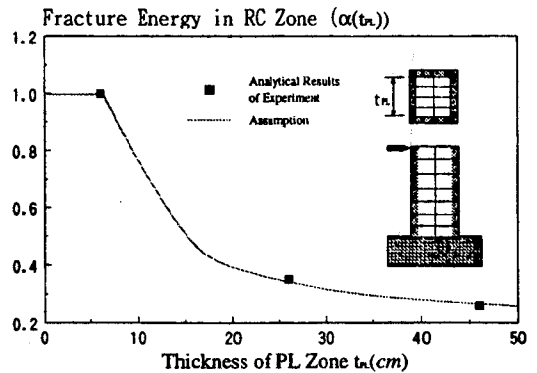


그림 13 무근영역 두께에 따른 RC영역의 에너지 소산율

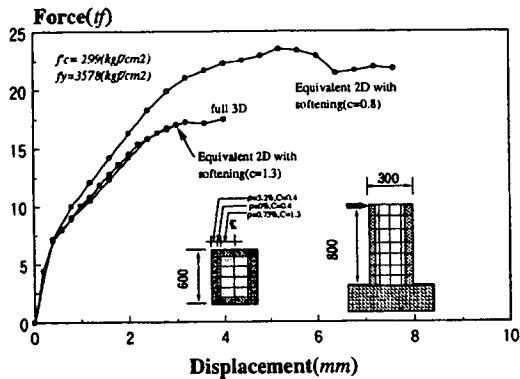


그림 14 등가 연화계수를 고려한 2차원 해석과 3차원 해석의 비교

과 같은 대단면에 철근이 집중된 구조물의 비선형 거동을 2차원 해석에서도 정도 높게 모사할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

콘크리트 구조물의 비선형 거동 예측을 위해서는 분산 균열 모델에 기초한 3차원 유한요소 해석법이 유효한 방법이다. 재료의 정도 높은 비선형 거동 모델은 이를 위해 필수불가결하다. 철근 콘크리트의 재료 구성모델은 콘크리트와 철근의 구성식으로 표현할 수 있다. 콘크리트의 구성식은 작용응력 상태에 따라 압축, 인장, 전단의 구성식으로 구성된다. RC의 경우 균열 발생 후에 인장응력이 서서히 감소하는 인장 경화 현상이 특징이다. 무근의 경우는 균열 발생 후 급격한 인장/전단 응력 감소를 보이는 연화 현상이 특징이다.

교각과 같이 대단면에 철근이 집중되어 배근된 기둥부재는 철근에 의한 균열 제어가 전단면이 아닌 철근에 가까운 영역에 국한되어 일어나게 된다. 철근과 무근 영역을 적절히 구분하고 이에 따라 각기 다른 재료 구성식을 적용하면 정도 높게 교각의 비선형 거동을 3차원 해석으로 모사할 수 있다.

2차원 해석의 경우 out-of-plane 방향으로 RC와 무근 영역이 혼재하는 요소가 존재하게 되며 등가의 연화곡선 특성을 적용하면 3차원의 거동

특성을 2차원 영역에서도 유사하게 모사할 수 있다. 등가 연화 계수를 산정 할 때에는 변형도의 비선형 분포를 고려하여야 한다. 그렇지 않을 경우 교각의 강도 및 연성은 과대 평가 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Maekawa, K., Takemura, J., Irawan, P., and Irie, M. (1993), "Triaxial-elasto-plastic and fracture model for concrete", Proc. of JSCE, No.460, V18, pp.131~138, 1993.
2. Okamura, H. and Markawa, K. (1991), "Non-linear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete", Gihodo-Shuppan, Tokyo, Japan
3. Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H. (1989), "Contact density model for stress transfer cracks in concrete", *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo* (B), Vol40, No1, pp.9~52, 1989.
4. Kato, B. (1979) "Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions", CEB Bulletin D'information, 131, 7-27
5. Bazant, Z., P. and Oh, B., H. (1983) "Crack band theory for fracture of concrete", *Material and Structures, (RILEM, Paris)*, Vol. 16, pp.157~177, 1983.
6. Bujadaham, B. and Maekawa, K. (1992), "Qualitative studies on mechanisms of stress transfer cross cracks in concrete", Proc. of JSCE, No.451, V17, pp.265~275, Aug.
7. An, X., Maekawa, K. and Okamura, H. (1997), "Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams", *J. Materials Conc. Structures, Pavements, JSCE*, V-35, pp.297~316, May, 1997.