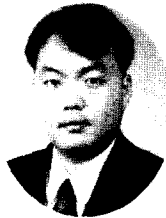
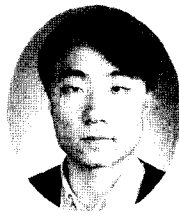


준취성 재료의 파괴역학 수치 해석 방법의 현황과 과제



김 장 호*



한 상 훈*



김 진 근*

일본 콘크리트학회(JCI)가 1999년 9월에 발간한 콘크리트 구조물에 대한 파괴역학의 현상이란 책자에서 하세가와 도시야키가 기술한 준취성 재료의 파괴역학 수치해석 방법의 현황과 과제라는 글을 번역·요약하여 소개한다.

1. 머리말

콘크리트 구조물의 파괴내력이나 외력에 대한 응답을 역학적 문제로 보고 해결하려고 하면 그 정확해를 구하기가 매우 어렵다. 콘크리트 특유의 재료비선형성, 파괴 특성보다 더 복잡한 실제 콘크리트 구조물의 복잡한 기하 형상이나 하중 조건, 경계 조건 등을 고려하거나, 콘크리트 구조물의 파괴 거동에 관한 역학적인 해를 얻기 위해서는 컴퓨터를 이용한 수치 해석 방법과 계산 역학적 방법을 적용하는 것이 통상적이다. 여기서는 콘크리트 구조물의 파괴에 관한 수치 해석 방법에 대해서 개설한다

콘크리트 구조물의 파괴 수치 해석 방법의 현황

에 관하여 전부를 상세히 설명하는 것은 지면수의 제한으로 불가능하다. 본 개설의 지면제한을 고려하여 파괴 수치 해석 방법에 관한 상세한 조사 연구 보고서를 요약하였다.

본 개설에서는 먼저 콘크리트의 파괴가 수치 해석에서의 이산화 관점에서 어떻게 모델화 되는지에 대해서 설명한 후, 콘크리트 재료의 파괴에 관한 구성 관계(응력-변형 관계)의 수치 모델화에 대해서 서술한다. 그와 같은 파괴 수치 해석 모델이 적용되어 있는 연구예제 및 시판 해석 코드에 관해서도 소개한다. 마지막으로 현재의 콘크리트 파괴 수치 해석에서의 과제 및 급후의 전망에 대해서 언급하고 싶다. 더욱이, 본 개설에서는 독자의 이해가 방해되지 않도록 이론 및 수치 모델에 관한 수식을 일절 게재하지 않기로 한다.

2. 파괴 해석 방법

콘크리트의 파괴 수치 해석으로는 응력상태에 따라 형태가 다른 콘크리트의 파괴모드를 어떠한

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과, 전임강사
** 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정
*** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과, 교수

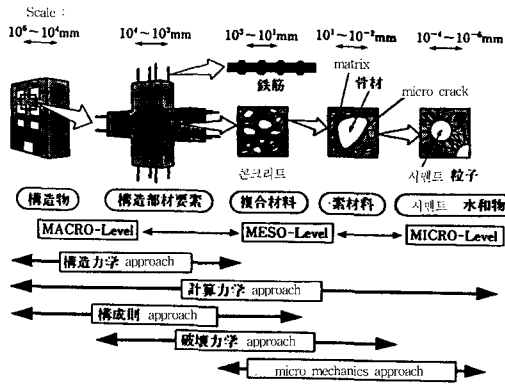


그림 1

레벨로부터 수치 모델 화하는지가 큰 문제가 된다. 그림 1은 콘크리트 구조물의 거시 레벨(macro-level), 중간 레벨(meso-level), 미소 레벨(micro-level) 및 이러한 레벨에 있어서 어떠한 역학적 접근이 많이 사용하는지를 나타낸 것이다. 콘크리트의 파괴 수치 해석은, 「파괴나 손상을 어떤 레벨로 모델화하고, 어떤 레벨의 콘크리트 구조물의 역학 문제에 적용하는지」에 의해 그 해석 방법은 크게 달라지므로 레벨에 따라 합리성이 높은 역학적 접근을 사용할 필요가 있다.

2.1 미세역학 방법

거시 레벨에서는 언뜻 보기에 다른 파괴 형태도 중간 레벨이나 미소 레벨에 있어서는 유사한 미세 균열의 발생, 전파, 축적과정이 되어 동일하게 다룰 수 있다. 이와 같은 파괴 해석 방법으로 미세역학 방법이 있다. 미세역학 방법은 콘크리트의 재료 내부 구조의 붕괴 과정을 설명하기 위해서 대단히 유효한 해석 방법의 하나이다(해석예 : 그림 2).

2.2 거시적 연속체 해석 방법

미세역학 방법과 같이 파괴를 미세균열 레벨로부터 모델화 하는 것이 아니고 연속체에 분포한 손상으로 가정하여 응력-변형 관계에서 그 손상을 고려하는 거시적 연속체 해석 방법이 구조공학적인 입장에서는 보다 현실적인 파괴해석 방법이라고 말할 수 있다.

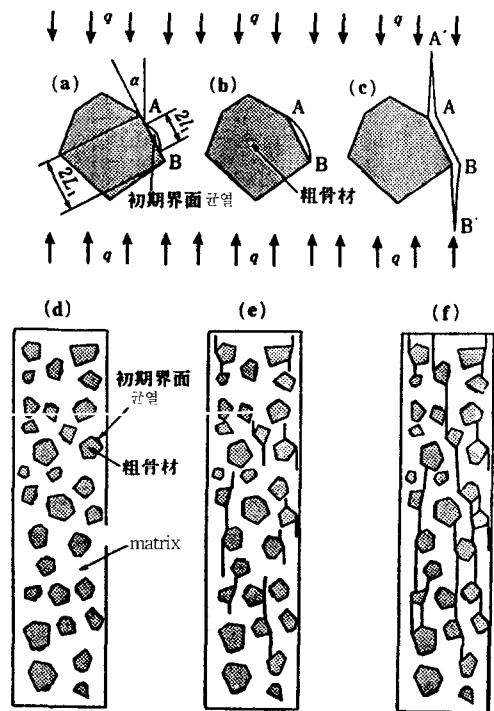


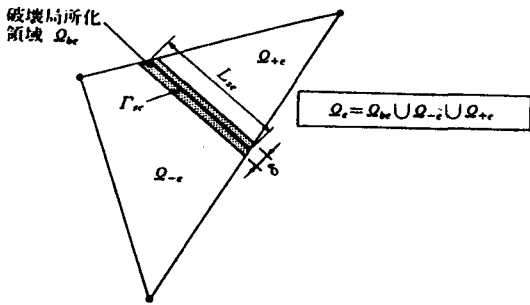
그림 2

2.2.1 국소 파괴 해석 방법

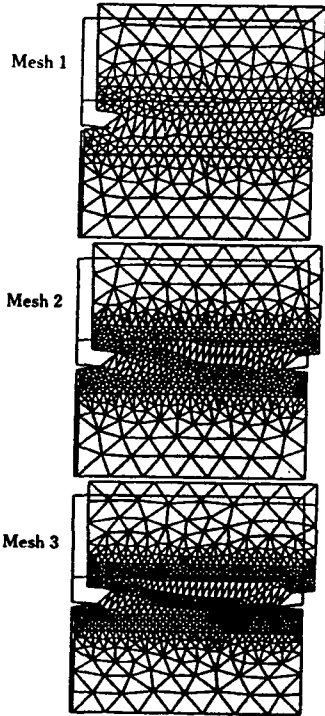
국소 파괴 해석 방법은 콘크리트에 생기는 파괴나 손상을 구성관계식에 의해 표현하는 것이다. 종래에 주로 행해졌던 국소 파괴 해석으로는 파괴 에너지의 일정치를 고려하지 않고 유한요소법에 의한 이산화나 인장 연화 구성 관계를 설정하는 경우가 많았다. 또 압축 파괴·손상에 관한 에너지적 관점에서도 이산화나 압축 연화 구성 관계 설정을 하는 것이 적지 않았다. 그 때문에 통상 연속체 역학을 바탕으로한 이산화 수치 해석 방법 개념을 콘크리트 구조물의 국소 파괴 해석에 직접 적용하면 해석 결과가 유한 요소 치수나 메쉬에 의존하는 등의 문제가 발생한다.

2.2.2 파괴에너지를 고려한 국소 파괴 해석 방법

유한 요소 치수에 의해 파괴 최대 내력은 파괴 모드가 다른 객관성이 없는 해석 결과를 가져오는 통상의 국소파괴해석 방법의 결점을 보완하기 위해 몇가지의 해석 방법이 개발 되어 있다.



(a) 破壊局所化領域을 넣은 有限要素



(b) 軸引張変位 $p_t = 65 \times 10^{-4} \text{mm}$ 때의 変形

그림 3

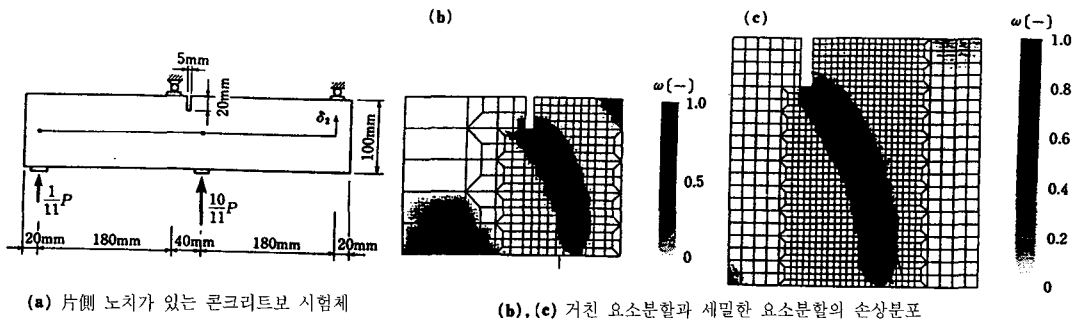
인장 파괴에 대해 Bazant가 제안한 균열띠모델 (Crack Band Model)은 콘크리트의 파괴 진행 영역 (fracture process zone)에 대응하는 유한요소내에서 소산되는 에너지를 일정하게 하여 파괴 진행 영역의 인장 연화 구성 관계를 규정하는 비선형 파괴역학 모델이다. 균열띠이론으로 인장파괴를 해석하면 해석 결과의 메쉬 의존성을 감소시킬 수 있다.

2.2.3 파괴 국소화를 고려한 국소 파괴 해석 방법

균열띠모델은 균열파괴영역을 유한 요소와 일치시켜 내부의 변위나 변형이 연속적으로 분포시키는 것으로 일반적인 유한요소에 사용된다. 이에 반해, 유한요소 내부에 파괴가 국소화 하는 영역을 도입하여 단일 유한 요소에 파괴와 미파괴 변위나 변형이 존재한다고 가정하는 정식화 방법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다(해석 예 : 그림 3).

2.2.4 비국소 파괴 해석 방법

일반적인 응력상태, 특히 전단이나 압축 응력상태에서의 파괴 국소화 현상에 대해서, 앞에서 말한 국소 파괴 해석 방법을 적용하는 것은 합리적이지 않다. 비국소 파괴해석 방법은 종래의 연속체 이론을 수정한 것으로 일반적인 파괴 국소화 문제를 해결할 수 있다. 통상의 연속체 역학에서는 연속체 중의 국소점은 어디까지나 그 국소영역에서의 역학적 정보만에 의해 규정되기 때문에 국소적인 성질을 가지다고 말할 수 있다. 한편 비국소 연속체 역학에서는 국소점은 그 점뿐만 아니라 다른 국소점에 의존한다고 가정한다. 최근에, 연구되고있는



(a) 片側 노치가 있는 콘크리트보 시험체

(b), (c) 거친 요소분할과 세밀한 요소분할의 손상분포

그림 4

비국소 파괴해석 방법으로는 비국소 공간 평균화 이론, 구배 이론, Cosserat이론 등이 있다.

국소 연속체 역학의 구성 방정식은 국소점의 상태 변수나 재료 내부 변수에 의존하는 형식을 취하는 것 통상적이지만, 구배 이론에서는 그 변수들의 공간 구배를 독립 변수라고 정하여 비국소 형식의 연속체 역학 모델을 구축하는 것이다 (해석예 : 그림 4)

2.3 불연속체 해석 방법

거시적 연속체 해석 방법에서는 파괴를 기하학적인 불연속면으로 가정하지 않고 연속적으로 분포하는 것으로 하여 요소를 발생시킨다. 이에 비해, 불연속체 해석 방법은 파괴면을 기하학적으로 분리된 구조 경계로 하고, 콘크리트의 파괴 해석에 관해서는 유한 요소법(경계 요소법)에 의한 가상 균열 모델(Fictitious Crack Model), 강체-스프링 모델(Rigid Body Spring Model), 개별 요소 모델(Distinct Element Model), 불연속 변형 모델(Discontinuous Deformation Model) 등을 이용한다.

2.3.1 유한 요소법에 의한 가상 균열 모델

Hillerborg의 가상 균열 모델은 인장 파괴를 대상으로한 비선형 파괴역학 모델(결합력 모델)로, 콘크리트의 파괴 진행 영역을 가상적인 단일균열면으로 모델화하여 이 면의 균열개구폭(변위)과 그 면에 작용하는 응력(결합력)과의 관계를 인장 연화 구성 관계로서 주는 것이다. 유한 요소법에서는 균열면에 이중절점을 설치하고, 그 이중절점

을 사이를 결합길이가 없는 스프링으로 균열개구폭-응력 사이의 인장 연화 구성 관계를 가정하는 경우가 많다. 적응 유한 요소법(adaptive finite element method)은 균열발생에 따라 유한 요소의 재분할을 실행하고, 유연한 균열추적이 가능하다 (해석예: 그림 5).

2.3.2 강체-스프링 모델

강체-스프링 모델은, 연속체를 변형하지 않는 강체 요소로 분할하고, 이 강체요소 사이에 탄성·비탄성의 스프링이 분포하고 있다고 가정하는 불연속체 해석 방법으로 카와이에 의해 제안된 것이다. 이 모델에서는 파괴가 강체요소간 스프링의 비탄성 특성에 의해 표현된다(해석예 : 그림 6).

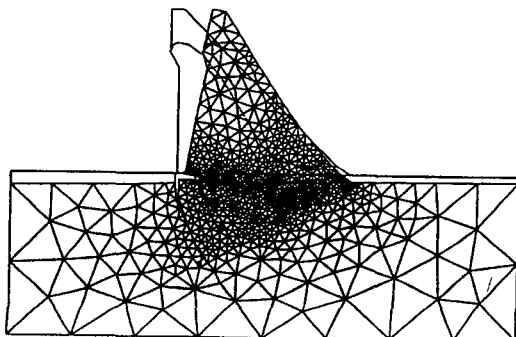
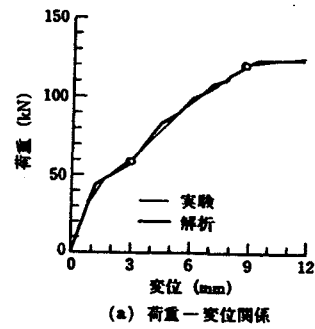


그림 5

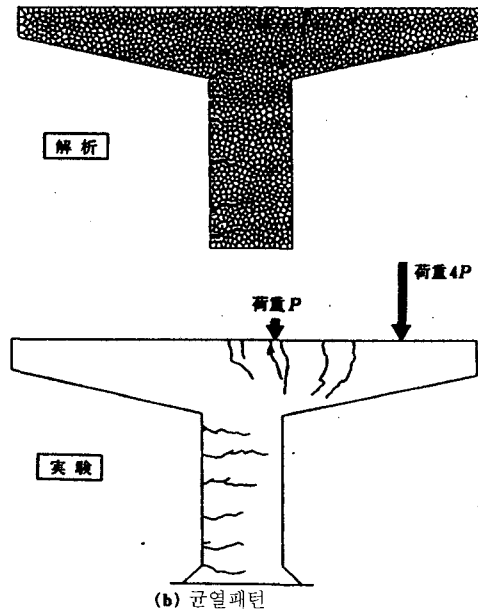


그림 6

2.3.3 개별 요소 모델

개별 요소 모델은 토질 재료 등의 입상체에 대해 Cundall이 제안한 불연속체 해석 방법이다. 이 모델에서는 입상체를 구성하는 원판 모양(2차원의 경우) 또는 구모양(3차원의 경우)의 강체블럭이 스프링과 dash-pot의 결합체로 가정하고 각 강체블럭의 운동 방정식을 차분법에 의해 하나하나 해석해 나가는 방법이다.

2.3.4 불연속 변형 모델

불연속 변형 모델은 질리성 암반의 안정성 해석을 위해서 개발된 것으로 구조체 내부를 분할 가능성이 있는 블럭으로 분할하고, 그 블럭의 접촉과 분리를 역학적으로 기술하는 방법이다. 각 블럭은 변형이 가능하고, 유한한 강성을 가진 것으로 가정한다(해석예 : 그림 7).



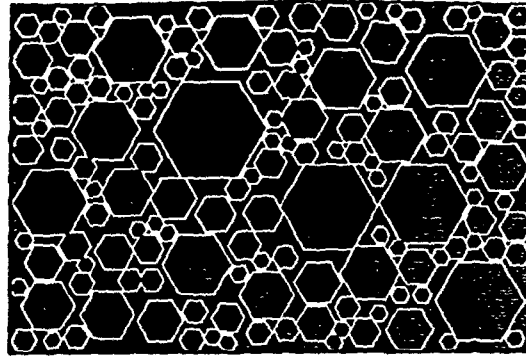
그림 7

2.4 중간 레벨 방법

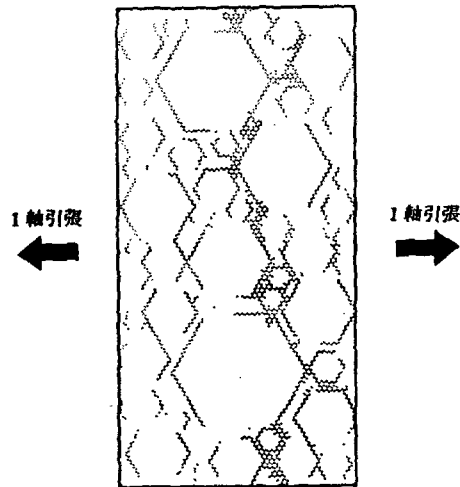
중간 레벨 방법은 콘크리트를 구성하는 모르타르 매트릭스, 조골재, 모르타르 매트릭스-조골재의 계면을 기하학적으로 이산 수치 모델화 하는 것이다. 전술한 미세역학 방법도 이와 같은 중간 레벨의 관점에 입각한 것이지만, 미세역학 방법은 미세균열을 기하학적인 양으로 기술하여 그 전파에 착안했던 것으로 보다 협의의 파괴역학으로 충실한 것이다. 중간 레벨 방법의 콘크리트 파괴 해석 방법으로는 수치 콘크리트 모델(Numerical Concrete Model), 격자 모델(Lattice Model), 입자 모델(Particle Model) 등이 연구되고 있다.

2.4.1 수치 콘크리트 모델

Roelfstra, Sadouki, Wittmann의 수치 콘크리트 모델은 유한 요소법에 의해 콘크리트를 모르타르 매트릭스, 조골재, 모르타르 매트릭스-조골재의



(a) 1軸引張試驗體의有限要素 mesh의 예



(b) Mortar matrix - 粗骨材의 계면에 생긴 micro crack

그림 8

계면 등의 유한 요소로 세분화한 것이다. 각각의 구성 재료에 다른 재료 특성을 주고, 복합 재료로서 콘크리트의 역학 특성을 수치 해석적으로 명백히 하려고 하는 것이다(해석예 : 그림 8).

2.4.2 격자 모델, 입자 모델

격자 모델(Lattice Model)에서는 콘크리트구조물을 대단히 세분화된 격자로 분할·이산화 하고, 콘크리트의 구성 재료인 모르타르 매트릭스, 조골재, 모르타르 매트릭스-조골재의 계면 등에 대응하는 각각의 격자 요소를 결정한다. 각 격자 요소는 그 양단의 격자점에 있어서 병진자유도 및 회전자유도를 가진 truss 또는 보에 의해 모델화 된다. 파괴 기준을 만족한 격자 요소는 해석 구조에서

제거되는 경우가 많다. Schlangen이나 VanMier 등의 격자 모델과 비교해서 Bazant 등에 의해 개발된 입자 모델(Particle Model))에서는 콘크리트를 한 종류의 재료로 격자 이산화를 진행시키고, 격자 요소의 축 방향 병진 자유도만이 고려된다.

3. 재료 파괴의 모델화와 구성칙

앞 절에서는 주로 이산화의 관점에서 콘크리트 구조물의 중요한 파괴해석 방법에 대해서 설명했지만 이러한 파괴해석 방법에는 콘크리트(모르타르 매트릭스, 조골재, 모르타르 매트릭스-조골재의 계면), 철근, 철근과 콘크리트의 부착 등에 관한 구성 관계를 적절하게 설정하는 것이 그 해석 정밀도를 좌우한다. 여기서는 콘크리트 구조물의 파괴 해석으로 관련되는 콘크리트의 구성 관계에 대해서 설명을 하고자 한다

3.1 파괴·손상과 구성 관계, 변형 연화

중간 레벨, 미세 레벨에 있어서 생기는 현상(미세균열, 미끄러짐, 시멘트 경화체의 압밀 등)이 구성 모델에서 어떻게 수치 모델화되는 지는 전문적인 파괴 해석 방법과 관련이 있고 「파괴나 손상을 어떤 레벨로 모델화하고, 어떤 레벨의 콘크리트 구조물의 역학 문제에 적용할 것인지」에 크게 의존한다. 일반적인 연속체 역학 이론에 있어서 재료의 구성칙은 그 재료의 파괴·손상칙과 분리해 생각해야 하는 것이다. 그렇지만, 콘크리트 재료의 경우에는 구성 관계와 파괴·손상이 밀접하게 관련되어 있고, 많은 콘크리트 구성 모델은 파괴·손상칙을 포함하는 형식으로 기술되어 있다.

일반적인 파괴·손상은 응력-변형 관계에서의 제하강성의 약화 및 변형 연화에 의해 거시적으로 확인할 수 있다. 콘크리트는 저구속압에 있어서 취성적인 파괴가 발생하지만, 구속압이 증대되면 연성적인 소성 거동으로 변화한다. 즉 취성-소성 천이 거동을 나타낸다. 콘크리트의 파괴·손상을 구성 관계로서 다루는 경우에는 준취성거동, 변형 연화를 고려하는 것이 꼭 필요하다.

3.2 콘크리트의 구성 모델

콘크리트공학 분야에서 연구되어 사용되어온 콘크리트의 구성칙은 현상 모델(phenomeno logic model)과 물리 모델(physical model)로 나눌 수 있다. 전자는 콘크리트의 비선형성 발생 메카니즘을 고려하지 않고, 응력과 변형의 관계를 기술하는 것으로, 콘크리트의 미시적 구조나 미시적인 내하기구가 직접적으로 반영되어 있지 않다. 한편, 후자의 물리 모델은 콘크리트의 미시적 구조를 기하학적으로 규정하고, 콘크리트의 비선형성이나 파괴를 지배하는 미시적인 내하기구를 직접적으로 고려하는 것이다. 구성칙에 있어서 미시적 메카니즘을 고려하는 것은 모델에 역학적 합리성이나 이론적인 명쾌함을 주고, 모델의 고성능화로 이어지는 것이 된다.

기존의 콘크리트의 구성칙은 현상 모델에 속하는 것이 대부분이다. 물리 모델에 속하는 구성칙은 현상 모델과 비교해 대단히 그 수가 제한되어 있는데, 파괴역학에서의 인장 응력하의 결합력 모델로 사용되는 몇몇 모델이 이 물리 모델에 속한다.

3.3 인장파괴에 대한 구성 모델

거시적 연속체 해석 방법의 파괴 에너지를 고려한 국소 파괴 해석 방법으로 설명했던 Bazant의 균열띠모델은 분포 균열 유한 요소 해석의 인장 연화 구성 모델로 사용되는 경우가 많다. 한편, 불연속체 해석 방법의 유한 요소법에 의한 가상 균열 모델로서 설명한 Hillerborg의 가상 균열 모델은 분리 균열 유한 요소 해석에서의 인장 연화 구성 모델로서 널리 사용되고 있다. 이러한 분포 균열 모델, 분리 균열 모델은 금속 소성 재료에서의 Dugdale-Barenblatt 모델 등의 결합력 모델을 연화 재료에 확장한 것이다.

분포 균열 모델은 균열이 2개 이상 허용되는 것이 많고, 다수의 균열 발생과 주응력방향의 회전을 어떻게 다루는지에 의하여, 고정 직교 균열 모델, 고정 다방향 균열 모델, 회전 균열 모델로 분류된다. 다음은 평면 문제로 한정해 이러한 모델을 설명한다.

3.3.1 고정 직교 균열 모델

고정 직교 균열 모델은 최대 주응력이 인장 강도에 도달하면 최대주응력의 직각방향으로 제1균열이 발생한다고 고려하는 것이다. 제1균열 발생 후에는 전단강성을 고려하거나 하지않음에 관계없이 제1균열 방향의 응력이 인장 강도에 도달하면 제2 균열이 제1균열의 직교방향으로 발생한다고 가정한다. 이 고정 직교 균열 모델은 대단히 딱딱한 전단응답을 나타내는 것으로 알려져 있다 (해석예 : 그림 9).

3.3.2 고정 다방향 균열 모델

고정 다방향 균열 모델도 최대 주응력이 인장 강도에 달한 경우에 최대주응력의 직각방향으로 제1균열이 발생한다고 가정한다. 제1균열이 발생한 후에는 전단응력에 의해 최대 주 응력축이 회전하고, 최대 주응력이 다시 인장 강도에 도달하면 그 최대 주응력축의 직각방향으로 제2균열이 발생한다고 가정한다. 제1균열의 방향으로부터 제2균열의 발생방향까지는 최소 허용 각도를 역각도 α (threshold angle)라고 하고, 이것이 90도의 경우에는 고정 직교 균열 모델을 표현하게 된다. 고정 다방향 균열 모델에서는 $(180/\alpha)$ 각도의 균열 발생을 허용한다. 역각도가 적은 경우에는 전단응답이 부드러워지고, 철근 콘크리트 구조물의 사인장 전단 인장파괴의 발생이 쉬워진다.

콘크리트는 균열이 발생한 후에도 파괴 진행 영역 또는 균열면에서의 마찰·골재의 맞물림에 의해, 전단강성이 부분적으로 잔존한다. 고정 다

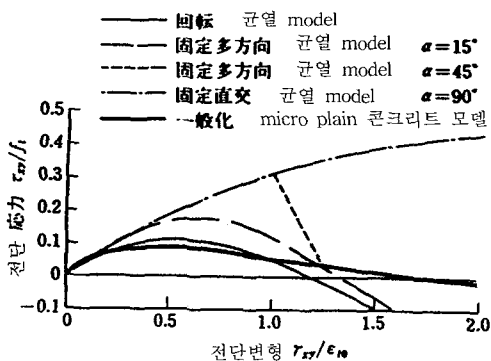


그림 9

방향 균열 모델에서는 이와 같은 균열이 발생한 후의 전단 전달 강성을 탄성 전단 강성에 저감 계수 β (shear retention factor)를 곱한 값으로 하는 경우가 많다. 고정 다방향 균열 모델은 전단강성을 고려하기 위해 주응력축과 주변형축이 일치되지 않는다.(해석예 : 그림 9, 10)

3.3.3 회전 균열 모델

회전 균열 모델은 주응력축과 주변형축이 항상 일치하도록 전단강성 및 전단력을 계산하는 것이다. 회전 균열 모델은 대단히 부드러운 전단응답을 나타내고, 철근 콘크리트 구조물의 사인장 파괴를 재현하는 것에 적합하다(해석예 : 그림 9, 10)

그림 9와 10에서 나타난 바와 같이 인장과 전단이 조합된 혼합 모드의 균열파괴를 분포 균열 모델에 의해 유한 요소 해석을 하는 경우에는 전단의 모델화를 신중하게 행할 필요가 있다.

3.4 압축 파괴에 대한 구성 모델

3.4.1 탄소성 모델

압축응력하의 콘크리트의 구성 관계는 예전부터 소성 이론에 의해 기술되었다. 그렇지만, 소성 이론은 기본적으로 경화 재료 즉 변형의 증가와 함께 응력도 증가하는 재료의 비가역 변형을 다루는 것이고, 콘크리트의 파괴·손상에 기인하는 변형 연화나 제하강성의 점진적 저하를 합리적으로 기술할 수 없다. 콘크리트의 변형 연화를 형식적

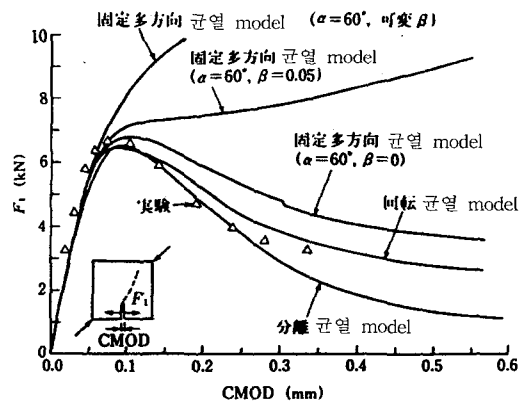


그림 10

으로 표현할 수 있도록 개발된 탄소성 모델은 수 없이 존재하지만 그것들은 단조재하경로에서의 콘크리트의 경화·연화를 표현할 수 있지만, 연화 영역에서의 제하강성의 점진적 저하로 대표되는 변형 연화의 본질을 표현할 수는 없다.

3.4.2 손상 모델, 파괴 이론 모델

파괴역학이 하나 혹은 유한개의 거시 균열을 포함하는 재료를 주로 대상이라고 하는 것에 대해, 손상 역학은 미세균열 또는 미시공극이 분산된 재료의 강도나 변형을 기술하는 것이다. 손상 역학에 기초한 콘크리트의 구성 모델에서는 재료 내부의 결합 즉 손상 증가에 동반하여 재료의 내하영역이 결손되어 나가기 때문에 재료 강성의 점진적 저하가 생기고, 변형 경화, 최대응력, 이에 잇따르는 변형 연화가 표현된다.

파괴 이론(fracturing theory)은 변형 공간에서 정의되는 파괴곡면에 변형이 도달한 경우에 파괴가 진행되는 것을 고려하여 변형 연화를 합리적으로 표현한다. 그렇지만 손상 이론에 의하면 파괴변형은 제하시 실제적으로 가역적인 것으로 되고, 제하에 의한 비가역인 잔류 변형을 표현할 수 없다.

3.4.3 소성과 파괴·손상의 조합 모델

압축응력하의 콘크리트의 구성 관계는 소성 이론과 손상 이론 또는 파괴 이론을 조합하여, 제법 양호하게 표현할 수 있기 때문에, 여러 가지의 조합 모델이 개발 되어 있다.

3.5 인장 파괴와 압축 파괴의 통일 구성 모델

콘크리트 구조물의 많은 파괴 해석 프로그램에서는 전술한 인장 파괴에 대한 구성 모델과 압축 파괴에 대한 구성 모델을 발생하는 응력상태에 따라 적절히 분리해서 사용하고 있다. 그와 같은 경우, 인장-압축응력상태나 전단응력상태 등에서의 파괴·손상을 합리적으로 정밀하게 잘 평가하는 것이 어렵다. 예를 들면, 균열발생 후의 직교 방향의 압축 특성을 과대 또는 과소평가 하거나, 전단이 지배적인 내력이나 응답을 과대평가하는

등의 문제가 발생한다. 그래서 최근에는 인장 파괴와 압축 파괴를 동시에 기술하는 구성 모델이 연구 되고 있다.

3.5.1 종래의 구성 모델의 확장

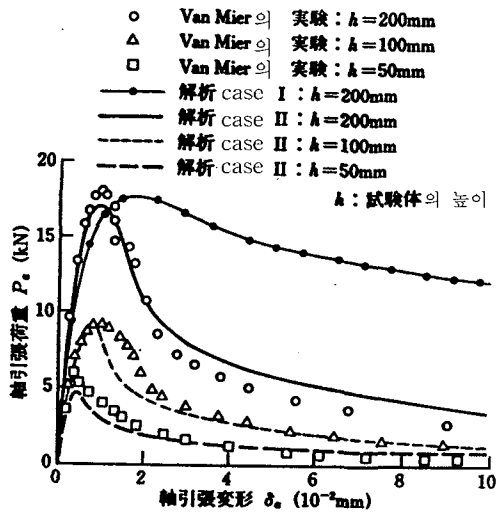
전술했던 탄소성 모델, 손상 모델, 소성과 파괴·손상 조합 모델에서의 변수·상태량(응력, 변형, 항복 계수, 손상 계수 등)이나 재료 정수를 압축과 인장에 있어서 별개로 정의하는 형태로 확장한 구성 모델이 많이 개발되어 있다.

3.5.2 마이크로 plane 모델

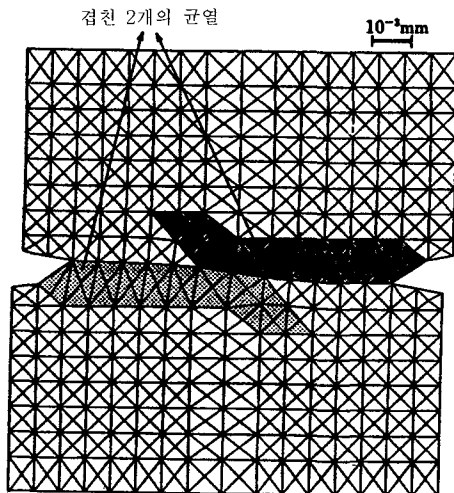
마이크로 plane 모델은 콘크리트의 미시적인 물리 모델 또는 중간 레벨을 보다 강하게 고려한 구성척이다. 콘크리트중의 조골재와 조골재에 인근한 모르타르 매트릭스의 박약한 면영역에서는 미세균열이 다량으로 발생하고, 또한 조골재와 모르타르 매트릭스간의 계면박리도 발생하기 때문에, 이 얇은 면영역은 콘크리트의 비탄성의 원인이라고 할 수 있다. 마이크로 plane 모델은 이 얇은 면영역을 마이크로 plane이라고 부르고, 여러 가지 방향의 마이크로 plane상에 미시적인 응답을 중복하는 형태로 콘크리트의 구성척을 기술하는 것이다. 이렇게 하면, 거시적인 인장 응역상태와 압축응력상태를 구별할 필요가 없고, 인장 파괴, 압축 파괴, 전단파괴 등을 함께 기술할 수 있다 (해석예 : 그림 9).

3.6 비국소형 구성 모델

전술했던 비국소 파괴 해석 방법은 콘크리트의 파괴특성에 관한 비국소성을 경계 조건이 포함된 형태로 표현하고, 그 역학 방정식을 푸는 것이지만, 콘크리트의 구성척은 기본적으로 국소성을 유지하는 것이라고 생각하고 있다. 이와 같은 사고 방식과는 달리, 구성척을 국소적인 것이 아니라, 고려하는 콘트롤 볼륨의 치수나 형상에 의존하는 비국소인 형태로 정식화 하는 방법도 생각될 수 있다. 치수에 의존하지 않는 종래의 구성척(연속체 역학 이론에서의 협의의 구성척)을 국소형 구성척으로 정의하면, 콘크리트 재료 등의 치수 의



(a) 軸引張荷重—軸引張變形關係



(b) 増分變形 (h=50mm)

그림 11

존성을 표현한 비국소 특성을 고려할 수 있는 구성적은 비국소형 구성칙이라고 칭할 수 있다.

인장 연화 파괴 경우와 달리, 압축 연화 파괴나 전단파괴에서는 파괴 영역과 비파괴영역을 명확하게 구별하는 것이 어렵기 때문에, 일반적으로 다축 응역상태에 대한 비국소형 구성 모델을 만들어 내는 것은 곤란하다. Hasegawa는 콘크리트의 미시적 내하기구를 연화 파괴 집중의 파괴상과 그곳에 탄성 에너지를 공급하는 제하상으로 이루어지는 직렬상으로 생각하고 이것이 콘크리트 내

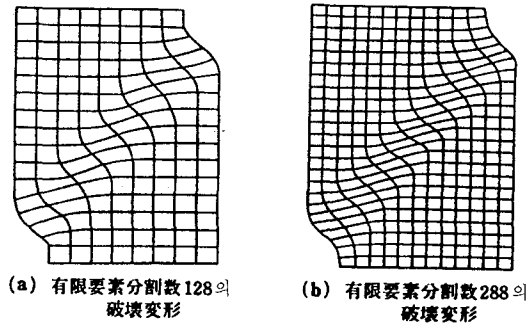


그림 12

부에서 임의의 방향으로 분산한다고 하는 레올로지 모델에 기초해 일반적인 다축 응역상태에 적용 가능한 비국소형 구성칙으로서 다등가 직렬상 모델을 정식화 하고 있다(해석예 : 그림 11). Xu, Pietruszczak은 폭과 방향을 가진 파괴 경계 영역을 콘트롤 볼륨내에 생각하고 그 파괴 경계 영역과 비파괴 영역의 변형 불연속성 및 그것들 영역의 구성 관계를 고려하여, 균질화 방법에 의해 이 콘트롤 볼륨 전체의 평균적인 비국소형구성 관계를 정식화 하고 있다(해석예 : 그림 12).

4. 파괴 해석 방법의 콘크리트 구조물에서의 응용

본 절에서는 전술한 파괴 해석 방법이나 구성 모델을 콘크리트 구조물의 파괴 해석에 응용하기 위해 이들을 프로그래밍한 시판 해석 코드에 대해서 설명하고자 한다.

4.1 시판 유한 요소 해석 코드

4.1.1 콘크리트 구조 유한 요소 해석 코드 SBETA
SBETA는 콘크리트 구조 해석 전용 2차원(평면 응력) 유한 요소 해석 코드로, Cervenka 등에 의해 개발된 것이다. 본 코드에서는 콘크리트의 구성 관계가 등가1축응력-변형 관계에 기초하는 직교 이방성 모델에 의해 기술되고 있고, 인장 균열 파괴에 관해서는 균열띠모델을 적용하고, 고정 균열 모델과 회전 균열 모델을 선택할 수 있다. 압축 연화 파괴에 관해서는 균열띠모델의 사고방식을 압축에 확장한 가상 압축 파괴면 모델(Fictitious

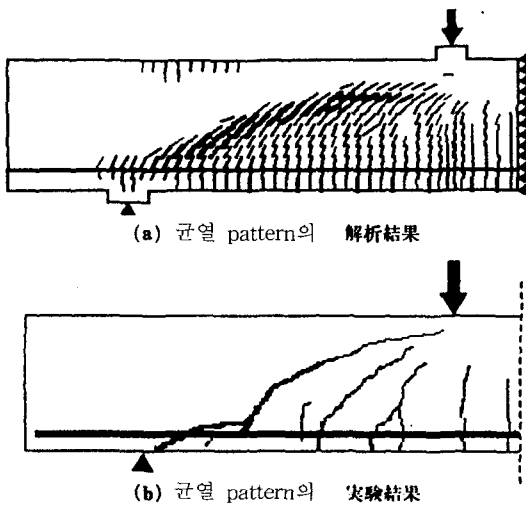


그림 13

Compression Failure Plane Model)이 사용되고 있다. 또 균열 방향의 콘크리트 압축 특성의 악화를 표현하는 Vecchio와 Collins의 수정 압축장 이론, 철근과 콘크리트의 부착을 고려하는 인장 강성 모델, 전단저감 계수의 균열변형과 철근비에의 의존성 등도 고려되어 있다(해석예 : 그림 13).

4.1.2 콘크리트 구조 유한 요소 해석 코드 WCOMD

WCOMD는 오카무라, 마에카와 등이 개발한 철근 콘크리트벽 구조물의 정적 반복재하 해석용 유한 요소 프로그램 WCOMR을 변형한 콘크리트 구조물 및 지반의 2차원 동적 유한 요소 해석 코드이다. 이 코드에서는, 압축 구성 관계로서 마에



그림 14

카와 등의 탄소성 파괴 모델이 상용되고, 인장의 구성 관계로서는 고정 다방향 균열 모델이 사용되고 있다. 또 접촉 밀도 함수에 의한 균열면에서의 전단전달 모델, 균열방향의 콘크리트의 압축축성의 상쇄 모델, 철근과 콘크리트의 부착을 고려하는 인장 강성 모델, 부재접합면에서의 철근 탈골을 평가하는 RC접합 요소 모델 등이 실험과의 비교를 통해 개개의 정밀도가 검증된 후 사용되고 있다(WCOMR의 해석예 : 그림 14)

4.1.3 범용 유한 요소 해석 코드 DIANA

DIANA는 올란드 응용 과학 연구 기구가 개발한 건설 분야용의 범용 유한 요소 해석 코드지만, 표준판(상용판)코드와는 별도로 DIANA협회에 속하는 연구 기관들이 source 코드를 공유하여 최신의 콘크리트 역학 모델을 프로그래밍하여 사용하고 있기 때문에, 특히 콘크리트 계산 역학의 분야에서 많은 실적을 올리고 있다. 표준판 코드에서는, 변형 연화를 고려할 수 있는 여러가지 탄소성 모델이 압축에 대해 사용이 가능하고, 인장에 관해서는 균열띠이론을 고려할 수 있는 고정 다축 균열 모델이 적용된다. 또 회전 균열 모델과 같이 주응력축과 주변형축이 일치하는 것에 기초로한 전변형 모델도 압축과 인장에 적용할 수 있다. 분리 균열 해석을 위한 구성 모델이나 균열면에서의 전단전달 모델도 포함하고 있다(해석예 : 그림 15, 그림 16).

4.1.4 범용 유한 요소 해석 코드 ABAQUS

ABAQUS는 Hibbitt, Karlsson & Sorensen사가 개발한 범용 유한 요소 해석 코드이다. ABAQUS의 콘크리트 파괴 해석용 구성 모델로서는 압축에 대해 Drucker-Prager형의 등방 경화탄소성 모델이, 또한 인장파괴에 대해서는 균열띠이론을 고려할 수 있는 고정 직교 균열 모델이 사용되고 있다. 또한 균열이 발생한 후의 전단저감 계수를 정수로 하고, 또한 균열에 수직한 탄성 변형의 함수로 설정할 수 있다. 철근 콘크리트벽과 같이 철근이 분산 배치된 철근 콘크리트의 구조 해석을 하기 위해서는 콘크리트와 철근의 구성 모델을 중복하는 형식으로 철근 콘크리트의 구성 모델을

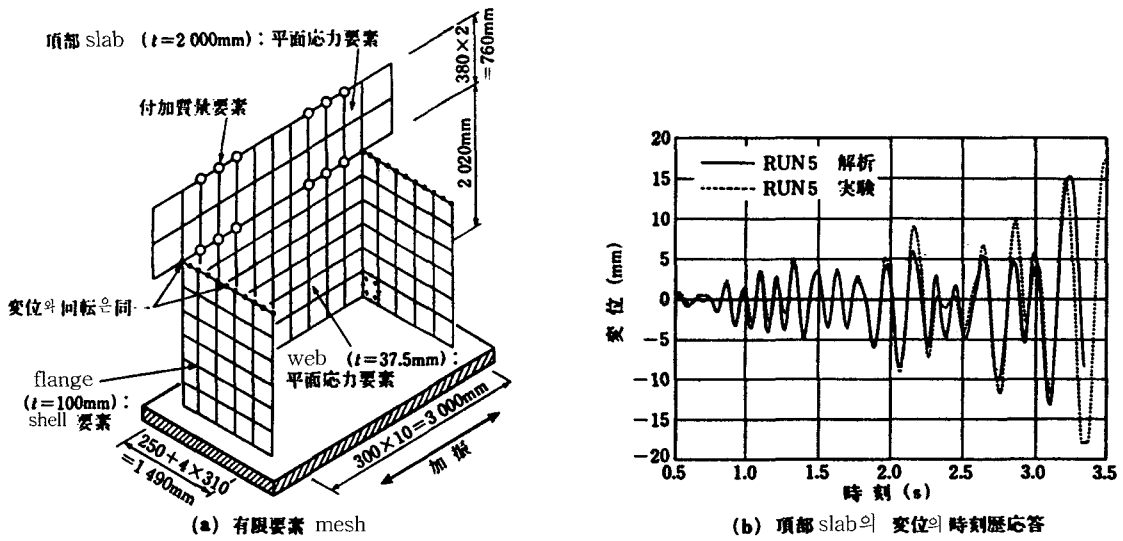


그림 15

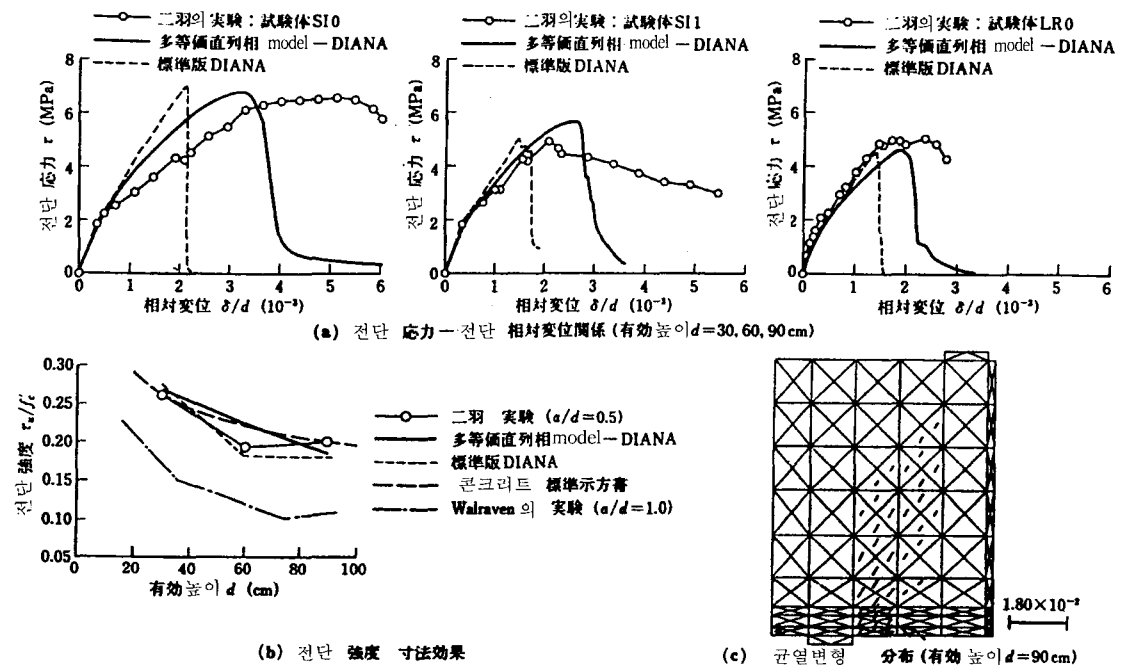


그림 16

정의할 수 있다.

4.1.5 범용 유한 요소 해석 코드 ADINA

ADINA는 Bathe가 개발한 범용 유한 요소 해석 코드로 기계공학 등을 주요한 적용 분야로 하고

있지만, Bathe 등이 개발한 콘크리트 구성 모델을 사용하는 것이 가능하다. 이 구성 모델은, 3축 강도 기준을 고려하여 1축응력-변형 연화 관계에 기초한 직교 이방성 아탄성 모델이고, 인장 파괴에 대해서는 균열띠이론을 고려할 수 있는 고정 직교

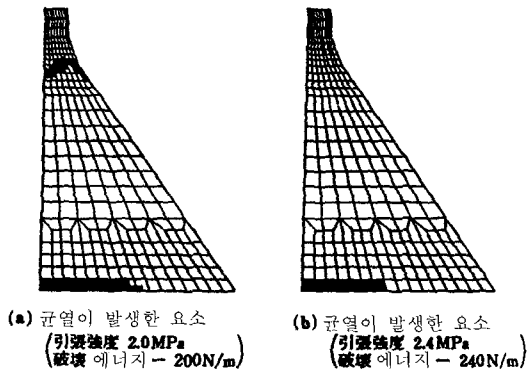


그림 17

균열 모델이 사용되고 있다. 또 균열이 발생한 후의 전단저감 계수를 균열에 수직한 변형률수로 설정할 수 있다(해석예 : 그림 17).

4.2 시판 충격 해석 코드

철근 콘크리트 구조가 항공기·차량의 충돌이나 낙석 등에 의한 충격 하중 또는 위험물이나 폭약의 폭발에 의한 폭풍 하중을 받는 경우에는 철근 콘크리트 구조의 충격파괴에 대한 안전성의 검토나 충격 수치 해석이 필요하게 된다. 개별 요소법도 충격 해석으로 사용되는 경우가 많지만, 일반적인 구조물의 충격 응답 해석 전용으로 개발된 코드(hydrocode)에 철근 콘크리트 구조물의 충격 파괴

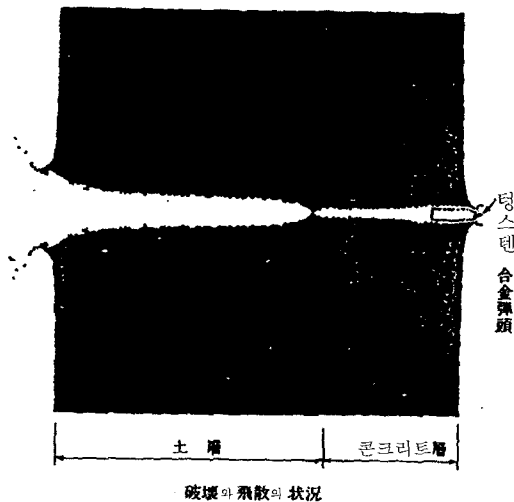


그림 18

해석으로 응용되는 것으로 LS-DYNA(DYNA-3D)이나 AUTODYN(해석예 : 그림 18)을 들 수 있다. 이러한 충격 해석 코드는 비교적 간단한 콘크리트 구성 모델 및 파괴모델을 채용하고 있는데 충격파괴에 특유하고도 불가결한 다음과 같은 기능을 가지고 있는 것이 특징이다. 시간적분에 관한 양해법, 대변형문제의 정식화로서의 Lagrange법, Euler법, ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)법의 선택 및 메쉬 재분할 기능, 충돌에 의한 접촉·상호 작용을 다루는 접촉 해석 기능, 충돌물의 관입·관통을 다루는 관입 해석 기능, 피충돌물과 충돌의 파괴·파단에 동반하는 비산을 다루는 기능, 재료의 변형 속도 의존성, 응력속도 의존성의 고려 등.

5. 현재의 과제와 금후의 전망

콘크리트 구조물의 파괴 현상은 대단히 고도의 비선형성을 동반하기 때문에 그 수치 해석은 여러가지 영향 인자에 좌우되고, 여러가지 문제점이나 과제를 안고 있다. 여기에서는 전술한 현상의 콘크리트 구조물의 파괴해석 기술로 쓰인 과제나 금후의 전망에 대해서 알아 보기로 한다

(1) 연화 파괴 국소화

유한 요소 해석에서의 스트레스 locking(stress locking)과 의사적 운동 모드(spurious kinematic mode)의 문제

(2) 거시적 연속체 해석 방법

1) 균열띠모델을 사용한 유한 요소 해석에 있어서 균열의 국소화가 얻어지지 않는 문제 및 균열띠폭의 설정법과 메쉬형상 의존성, 메쉬 방향성에 의한 바이어스의 문제

2) 파괴 국소화를 고려한 유한 요소를 사용한 경우에서 전단균열의 국소화와 스트레스 locking 및 압축 연화 파괴에 관한 광범위한 벤치 마크 해석의 필요성

3) 광범위한 응력상태에서의 구배 모델의 적용성, 특히 전단압축 및 다축 압축의 응력상태에 대한 검증

(3) 불연속체 해석 방법

1) 가상 균열 모델에 의한 adaptive법 분리균열 해석에 관한 메쉬 분할·재분할을 효율적으로 수행하기위한 방법의 개발

2) 가상 균열 모델에 의한 분리 균열 해석에서의 모드 II(전단연화) 및 압축-인장파괴의 취급방법

3) 강체-스프링 모델에서의 연속체 구성칙의 적용 방법

4)격자모델에서의 균열 폐합계의 취급방법

(4) 콘크리트의 구성 모델

1) 응력 주축 또는 변형 주축이 고정된 구성 관계 실험에 대해 적합한 구성 모델의 전단특성(전단 구성 관계와 전단연화)의 검증

2) 균열 발생 레벨로부터 골재의 맞물림 레벨까지의 광범위에 걸쳐 통일적인 전단 균열 모델의 개발

3) 콘크리트 구조물의 파괴해석을 하기 전에 실시해야 하는 구성 모델의 검증 해석

4) 구성 관계와 파괴에 관한 실험 데이터의 입력이 가능하지 않아 콘크리트 구조물의 파괴 해석을 실시하는 경우에 구성 모델, 파괴 모델의 파라미터를 간편하게 결정할 수 있는 방법의 확립

5) 파괴해석부터 얻어지는 구조물의 전체적인 정보(내력, 변위 응답, 균열발생상황, 변형 분포, 변형 모드 등)뿐만 아니라, 구조물의 각 부위(각 유한 요소)에 생기는 응력-변형 응답 등에 대해서 검토하고, 파괴 메카니즘을 파악하는 연구 방법의 확립

(5) 철근과 콘크리트의 부착 모델화

1) 무근콘크리트의 인장 연화와 철근 콘크리트의 인장 강성과의 관련

2) 일반적인 배근상태, 응력상태, 경계 조건에 있어서 적용 가능한 철근과 콘크리트의 부착 모델의 구축

(6) 시간 의존성 파괴, 파괴 속도 효과

1) 시간 의존성의 변형(점탄성, 점소성, 건조 수축·자기 수축 등)을 동반하는 파괴·손상에 관한 이론 및 구성 모델과 해석법의 개발

2) 파괴·손상 변형 속도 효과, 응력속도 효과에 관한 이론 및 구성 모델의 개발

(7) 분기 문제로서의 파괴 해석 방법

다수의 가능한 연화파괴경로부터 최적해 경로를 분기 문제·안정성 문제에서 추적할수 있는 방법의 확립

(8) 구해법과 수습 계산 방법

파괴 국소화 문제, 분기 파괴 문제로 적용하는 구해법과 수습 계산방법의 확립

(9) 해석 코드

1) 블랙 박스적 요인이 강한 범용 해석 코드의 해석 방법·모델에 관한 유저의 이해 부족이나 오사용을 적게 하기 위한 계산 역학 교육

2) 국내의 (또는 국제적인)해석 기술을 집약·통합하여 그것들의 종합적 비교·검증 및 이용이 가능하게 되는 플랫폼적 역할을 맡는 범용 유한 요소 해석 코드의 개발·공유 