

CSL 모델을 이용한 콘크리트의 재료거동 연구

Study of Material Behavior of Concretes Using CSL Model

지 광 습* 정 진 규**
Zi, Goangseup Jung, Jin-kyu

ABSTRACT

The recently developed confinement-shear lattice model is reviewed. The procedure for generating aggregates in a given specimen and the constitutive model for on aggregate-cement strut are shown. It is suggested that the model can easily be extended for early age concretes and fiber reinforced concretes. The state-of-art of the extension and the general procedure of the extension are given in this paper.

1. 서론

구조물을 해석할 때 관심 스케일(scale)에 따라 구조체 모델, 연속체 모델, 메소 모델 등으로 구분할 수 있다. 물론 분자 단위까지도 고려할 수 있겠지만 토목 구조물의 해석에 관해서는 실용적인 의미를 발견하기가 쉽지 않다. 현재 토목 구조체를 해석할 목적으로 개발된 모델 중에서 가장 작은 스케일은 메소 모델이며, 콘크리트 구조물과 콘크리트 재료거동의 정밀한 해석에 주로 이용된다. 이 모델은 두 골재와 시멘트 페이스트 간의 상호작용을 비선형적으로 모델한 후 다수의 골재로 구성된 콘크리트 구조물의 거동을 모사하기 위해 고안된 형태이다. 계산량은 양형 동적해석(explicit dynamic)의 경우, 골재의 개수와 비례하게 되므로 대용량의 계산을 수행하기는 무리가 따르나, 거의 가상의 콘크리트로 취급할 수 있어서 다양한 재하 조건하의 콘크리트 파괴를 연구할 수 있는 점이 그 장점이다.

인장균열과 모드 I 파괴를 높은 정밀도로 모사하지만, 압축거동과 변형열화 중 발생하는 스냅백(snapback) 현상을 모사하는 한계점을 해결한 모델이 Cusatis에 의해 개발되었다. 이 모델은 CSL(Confinement-Shear Lattice) 모델이라고 불리며, 인장파괴와 압축파괴에 공히 탁월한 성능을 보이고 있다. 이 모델은 (1) 인접한 골재들을 연결하는 격자 스트럿은 축방향 힘 뿐만 아니라, 전단력도 전달되며, (2) 스트럿의 인장 및 전단력으로 인한 거동은 스트럿과 직각방향의 구속 압력에 민감하게 영향을 받고, (3) 콘크리트의 내부 마찰거동을 반영하기 위해 격자 스트럿의 전단거동 채택한 점들이 기존의 모델들과는 구별되는 점들이다. 위와 같이 가정된 조건들로 인해 콘크리트의 강성, 강도, 비탄성 거동을 모델할 수 있으며, 식에 직접적으로 나타나지 않는 시멘트 페이스트, 작은 골재, 시멘트-골재 접촉면 등의 영향을 고려할 수 있다.

본 논문에서는 CSL 모델의 기본적인 역학을 검토하고, CSL 모델을 초기재령 콘크리트와 섬유보강콘크리트의 거동 분석에 적용하는 방안을 제시하였다.

2. CSL 모델

CSL 모델의 첫 번째 단계는 콘크리트 내부에 골재를 분포시키는 것이다. 콘크리트 내부에 골재가 랜덤하게 분포하는 것으로 가정하고, 특정크기 이상의 골재를 시편 내부에 랜덤하게 분포시킨다. 분포 알고리즘은 다음과 같은 세 단계 과정으로 이루어진다. (1) 기존 골재의 반경 주변에 또 다른 골재의

* 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수

** 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

부분이 위치하지 않도록 시행착오법을 통해 시편 전체에 골재 입자를 생성시킨다. (2) 생성된 각 골재의 중심점들을 Delaunay 사면체로 연결하여 격자(mesh)를 구성하는데, 사면체의 모서리는 인접한 골재 입자들을 연결하는 스트럿이 된다. (3) 이웃한 골재의 상호작용에 의한 힘의 전달은 스트럿 상의 한 접촉점에서 발생하게 한다. 힘이 전달되는 접촉면은 그림 1a와 같은 형상을 가지며, 모든 거동을 그림 1b와 같이 한점에 집중시킨다.

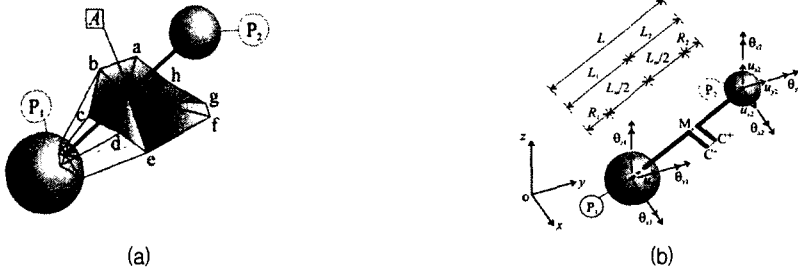


그림 1. (a) 인접 골재 간의 접촉면, (b) 스트럿의 기하학적 형상 및 자유도

스트럿과 접촉면으로 구성된 면을 스트럿에 수직인 방향으로 투영시킨 면과 스트럿으로 구성된 국부 좌표계(local system)에서 변형률 벡터의 성분은 단위 벡터 \mathbf{n} , \mathbf{l} , \mathbf{m} 을 사용하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_N = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_C}{L}; \quad \varepsilon_L = \frac{\mathbf{l} \cdot \mathbf{u}_C}{L}; \quad \varepsilon_M = \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{u}_C}{L}$$

유효응력 σ 는 유효변형률 ε 의 함수로서 다음과 같은 관계가 있다.

$$\dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon}, \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_b(\varepsilon, \omega)$$

여기서, $\sigma_b(\varepsilon, \omega)$ 는 소성론의 항복면과 유사한 개념인 응력 경계조건이며, 다음과 같다.

$$\sigma_b(\varepsilon, \omega) = \sigma_0(\omega) \exp\left\{ \frac{K(\omega)}{\sigma_0(\omega)} \left\langle \chi(\varepsilon, \omega) - \frac{\sigma_0(\omega)}{E} \right\rangle \right\}$$

여기서, ω 는 수직변형률과 수평변형률 간의 상호작용을 나타내는 변형률이고, $\tan \omega = \varepsilon_N / \sqrt{\alpha} \varepsilon_T = \sigma_N \sqrt{\alpha} / \alpha_T$ 인 관계가 있다. 함수 $\sigma_0(\omega)$ 는 그림 3a와 같이 탄성영역의 경계를 나타내고 다음과 같다.

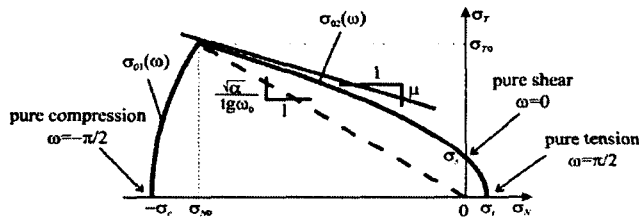


그림 2. meso-level에서의 탄성영역

$$\sigma_0(\omega) = \begin{cases} \sigma_{01}(\omega) & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ \sigma_{02}(\omega) & \text{for } \omega \geq \omega_0 \end{cases}$$

강도감소함수인 $\chi(\varepsilon, \omega)$ 는 파괴로 인한 손상의 비회복성을 모델하며, 다음의 식으로 나타낸다.

$$\chi(\varepsilon, \omega) = \begin{cases} \varepsilon & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ \varepsilon \frac{\omega}{\omega_0} + \varepsilon_{\max} \left[1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right] & \text{for } \omega_0 < \omega < 0 \\ \varepsilon_{\max} & \text{for } \omega \geq 0 \end{cases}$$

그림 2b에 나타낸 초기 기울기인 $K(\omega)$ 는 경계조건을 지배하며, 다음과 같다.

$$K(\omega) = \begin{cases} K_c \left[1 - \left(\frac{\omega + \pi/2}{\omega_0 + \pi/2} \right)^{n_c} \right] & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ -K_t f(\lambda) \left[1 - \left(\frac{\omega - \pi/2}{\omega_0 - \pi/2} \right)^{n_t} \right] & \text{for } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

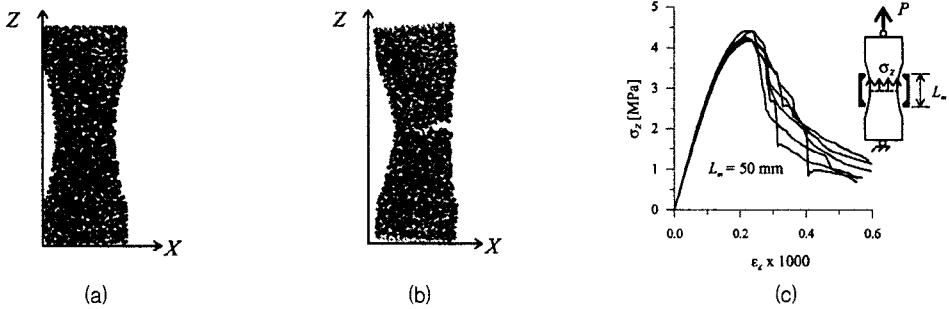


그림 3. (a) 인장시험에 사용된 시편, (b) 모델화된 파괴 형상, (c) 응력-변위 곡선

그림 3은 CSL모형을 사용해서 콘크리트의 일축 인장시험을 모사한 것이다. 실제 콘크리트 시편에 관찰되는 편축 균열(그림 3b)과 그림 3c와 같은 통계적인 분산이 잘 모사되었다. 이 밖에 일반 콘크리트에 대한 다양한 적용에는 참고문헌을 참조하기 바란다.

3. CSL 모델의 적용

3.1 초기재령 콘크리트

8일 이하의 초기재령에서 콘크리트의 기계적인 물성이 급격히 변화한다. 현 CSL 모델은 경화한 콘크리트에 대한 모델로서, 초기재령에서 발생하는 효과들은 고려되지 않았기 때문에 모델변수들을 시간의존적으로 수정할 필요가 있다. CSL 모델의 간단한 내부구조는 이와 같은 수정이 매우 효과적으로 이루어질 수 있다. 표면적으로 쉽게 측정이 가능한 재령의존적인 변수인 E =탄성계수, σ_c =압축강도, σ_t =인장강도가 일차적으로 고려되어야 하며, 그 외에도, σ_s =전단강도, μ =인장-전단 상호작용 기울기, K_c =비선형 압축거동 지배상수, n_c =비선형 전단-압축거동 지배상수, G_t =모드 I 파괴에너지, G_s =모드 II 파괴에너지 등도 고려되어야 한다. 직접 측정이 가능한 변수들이외의 다른 변수들의 파악은 1일, 7일, 10일, 28일의 서로 다른 재령에서 측정된 재료거동을 다양한 변수 값들로 모사한 후 회귀분석을 수행하는 일반적인 절차를 통해 접근할 수 있다.

3.2 섬유보강 철근콘크리트

섬유보강 콘크리트에서는 콘크리트 균열면에 위치한 섬유의 인장력에 의해 콘크리트의 연성을 증진시킨다. 섬유보강 콘크리트 내에 섬유는 랜덤하게 분포하지만, 초기 직선상태로 혼입된 섬유는 골재 주변에서는 그림 4a와 같이 골재를 감싸는 형식이 된다. 그러므로 개별적인 섬유를 정확히 모델하는 것은 간단한 일이 아니다. 그러므로 섬유보강 콘크리트에 CSL모형을 적용하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다. (1) 골재의 위치와 섬유의 배열은 서로 영향을 받지 않고, 병렬적인 관계이다. 즉, 동일한 변형을 이용해서 콘크리트의 변형률과 섬유의 신장률을 계산하고, 각각의 구성방정식을 통해 계산한 힘들을 선형으로 중첩한다. (2) 섬유의 실제적인 길이인 l_f 대신에 섬유가 영향을 미치는 영역의 크기를 정의하는 l_{eq} 를 사용하여 직선섬유 만을 고려한다. 즉, 길이 l_f 인 실제 곡선 섬유가 길이 l_{eq} 인

직선섬유로 치환된다. 여기서 l_f 와 l_{eq} 의 비율은 연구를 통해 계산되어야 한다.

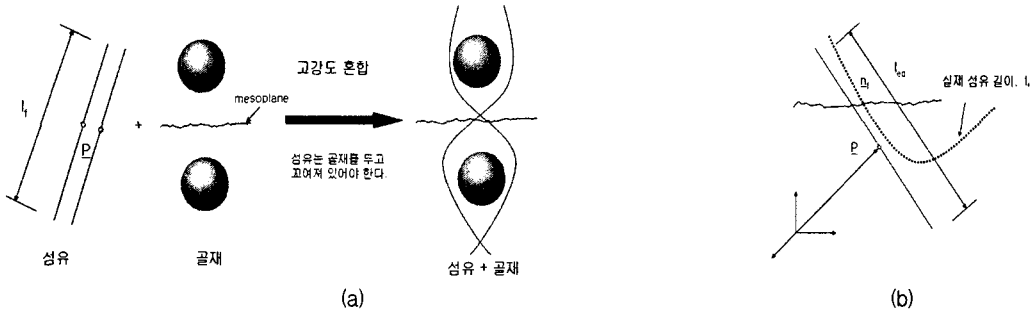


그림4. (a) 섬유 보강 콘크리트 결합 형상, (b) 섬유길이

전체 변형률을 이용해서 콘크리트의 변형률과 섬유의 변형률을 계산하는 것은 마이크로플레인 모델의 운동학적 구속조건과 유사한 방식으로 진행한다. 하지만 계산된 힘의 중점은 가상일의 원리를 이용하지 않고 단순한 벡터 합의 원리를 이용한다. 즉, 다수의 섬유가 접촉면에 위치한 경우

$$F = F_c + \sum_i F_i$$

여기서 F_c = CSL 모델에서 계산된 콘크리트 골재에 작용하는 힘, F_i = 섬유 i 의 변형으로 인해 발생한 힘이다.

5. 결론 및 추후 연구방향

최근 개발된 골재단위 해석기법인 CSL 모델의 기본 가정과 이론을 소개하였다. CSL 모델의 거중은 인장 및 압축에 대해서 매우 잘 거동하고 있으나, 경화된 콘크리트 만을 대상으로 하여, 초기 재령에서 발생하는 실제 콘크리트의 손상을 연구하기에는 개선될 필요가 있다. 본 논문에서는 CSL 모델을 이용해서 초기재령의 거동을 연구할 수 있는 가장 간단한 방안으로서 사용된 일부 변수들을 시간 혹은 재령의존적으로 확장하는 방안을 제시하였다. CSL모델의 간단한 구조에 기인하여 섬유보강 콘크리트에도 적용될 수 있는데, 이 때 필요한 조건들과 가정을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설기술기반구축사업인 (05기반구축D04-01)과 건설핵심기술연구개발사업인 (05건설핵심 D11)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Cusatis G, Bazant ZP, Cedolin L. (2003). "Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: I. Theory" *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 129, No. 12, pp. 1439-1448
2. Cusatis G, Bazant ZP, Cedolin L. (2003). "Confinement-shear lattice model for concrete damage in tension and compression: II. Computation and validation" *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 129, No. 12, pp. 1449-1458.
3. Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin. (2006) "Two-scale study of concrete fracturing behavior" *Engineering Fracture Mechanics*, available 6 March.