

재령효과를 고려한 미소면 모델을 적용한 매스콘크리트의 균열거동 해석

Analysis on the Cracking Behavior for Massive Concrete with Age-Dependent Microplane Model

이윤* 김진근** 이성태***

Lee, Yun Kim, Jin Keun Yi, Seong Tae

ABSTRACT

Concrete structure that has been constructed in real field is on multi-axial stress state condition. After placing of concrete, hydration heat and shrinkage of concrete can cause various stress conditions with respect to the restraint level and condition. So, to predict the early age behavior of concrete structure, multi-axial material model is required and microplane model is acceptable.

Recently, many studies have been performed on the microplane model, but the model developed up to now has been related to hardened concrete that material property is constant with concrete age. So, it is inappropriate to apply this model immediately to analyze the early age behavior of concrete. In this study, microplane model that can predict early age behavior of concrete was developed and cracking analysis using that was performed to describe cracking behavior for massive concrete structure.

1. 서론

콘크리트는 재령에 따라 재료 성질이 변하는 재료이다. 타설 후 수화반응이 진행됨에 따라 강도와 탄성계수, 크리프 특성과 같은 역학적 특성이 변화하게 된다. 따라서 대형 콘크리트 구조물의 경우에는 콘크리트의 재료적 특성이 전 부재에 걸쳐 균질하지 않으며, 이러한 콘크리트 부재의 비균질성은 초기재령에서 뚜렷이 나타난다. 따라서 콘크리트 타설 후부터 발생하는 수화열, 자기수축, 건조수축 등의 원인에 의한 초기균열거동을 예측하기 위해서는 재령에 따라 변화하는 콘크리트의 재료적 특성을 수치해석시 고려하여야 한다.

컴퓨터를 이용한 수치해석 방법으로 콘크리트 구조물의 균열 거동을 예측하기 위한 대표적 연속체 모델로는 강재의 재료 모델에 기초한 소성 모델(plasticity model), 콘크리트 재료의 손상정도를 수치적으로 규명하고 있는 손상 모델(damage model)과 미소면 모델(microplane model)이 있다. 이 중 미소평면 모델은 강재의 미끄러짐 이론(slip theory)에서 기초한 모델로서 콘크리트의 2축 압축, 3축 압축, 인장-압축, 압축-전단과 같이 다양한 응력 상태의 거동을 모사하고자 개발되어 왔다.

*정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

**정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

***정회원, 충청대학 토목공학과 교수

실제 현장에서 시공되는 모든 콘크리트 구조물은 모두 다축 응력 상태에 놓여 있으며, 특히 매스콘크리트의 경우는 타설 직후 발생하는 콘크리트 내외부의 수화열, 수축 현상에 의해 그 구속 정도와 조건에 따라 다양한 응력 상태에 놓이게 된다. 따라서 이 연구에서는 매스콘크리트 구조물의 균열거동을 예측하기 위하여 현재 콘크리트의 다축 거동을 설명하는데 우수한 모델로 인정받고 있는 미소면 모델을 적용하고자 하였다.^{1), 2)} 최근 들어 미소면 모델에 관한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 현재까지 개발되어 온 모델은 콘크리트의 재료특성이 시간에 따라 일정한 경화된 콘크리트를 그 대상으로 하고 있다. 따라서 이 모델을 재령에 따른 매스콘크리트의 거동 해석시 직접 적용하기에는 무리가 있으며, 이와 같은 이유로 이 연구에서는 콘크리트의 재령을 고려할 수 있도록 미소면 모델을 개선하여, 이를 매스콘크리트의 균열진전 해석에 적용하고자 하였다.

2. 재령을 고려한 미소면 모델의 개선

2.1 재령에 따른 압축 거동의 모사

미소면 모델에서 압축 응력-변형률 거동을 지배하는 응력 경계는 식 (1)과 같은 편차 경계이다. 이 연구에서는 이 응력 경계를 식 (2)와 같이 편차 변형률에 의존하는 함수 $f(\epsilon_D, \alpha)$ 를 이용하여 초기재령의 효과를 고려할 수 있도록 개선하였다. Fig. 1은 α , β 에 따른 함수 $f(\epsilon_D, \alpha)$ 의 변화를 보이고 있다. 식 (2)와 Fig. 1로부터 알 수 있듯이, $f(\epsilon_D, \alpha)$ 에서 α 는 개선된 편차 응력 경계의 비선형 정도를 나타내며, β 는 비선형 곡선의 모양을 결정하는 계수이다. 따라서 개선된 응력 경계에서는 특정한 콘크리트 배합과 재령에 따라서 이 두가지 파라미터 α 와 β 를 기존 응력 경계 파라미터 c_i , k_i 에 추가하여 실험결과를 분석함으로써, 하나의 콘크리트 재료에 대하여 재령에 따라 다른 거동을 모사할 수 있도록 구현하고 있다.

$$\sigma_D^{b-} = - \frac{E_D k_1 c_8}{1 + \left(\frac{\langle -\epsilon_D - k_1 c_8 c_9 \rangle}{k_1 c_7} \right)^2}, \quad \sigma_D^{b+} = - \frac{E_D k_1 c_5}{1 + \left(\frac{\langle \epsilon_D - k_1 c_5 c_6 \rangle}{k_1 c_{20}} \right)^2}$$

(1)

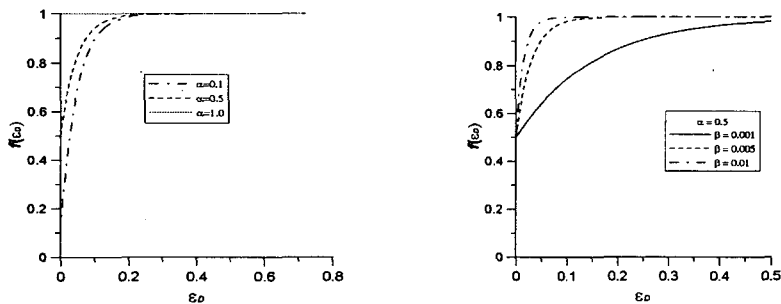


Fig. 1 α , β 에 따른 $f(\epsilon_D)$ 의 변화

$$\sigma_D^{b-} = -\frac{E_D k_1 c_8}{1 + \left(\frac{\langle -\varepsilon_D - k_1 c_8 c_9 \rangle}{k_1 c_7}\right)^2} f^-(\varepsilon_D, a_1), \quad \sigma_D^{b+} = -\frac{E_D k_1 c_5}{1 + \left(\frac{\langle \varepsilon_D - k_1 c_5 c_6 \rangle}{k_1 c_{20}}\right)^2} f^+(\varepsilon_D, a_2) \quad (2)$$

여기서, $f^-(\varepsilon_D, a_1) = (1 - a_1)[1 - \exp(-\beta_1 \varepsilon_D / k_1)] + a_1$,
 $f^+(\varepsilon_D, a_2) = (1 - a_2)[1 - \exp(\beta_2 \varepsilon_D / k_1)] + a_2$

물시멘트비 69%에 대한 재령 1일의 회귀분석결과를 살펴 보면, 편차 응력 경계를 개선하여 회귀분석을 수행한 경우인 Fig. 2의 우측이 응력 경계를 개선하지 않은 Fig. 2의 좌측에 비하여 현저히 최대 응력 이전의 비선형 거동을 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 기존의 응력 경계에서는 각각의 미소면위의 거동이 탄성-연화거동이므로 재령 초기에서 최대응력 이전의 완만한 경화 비선형 거동을 표현하지 못했지만, 개선된 응력 경계에서는 인위적으로 최대응력 이전에 탄성-비선형 경화-연화거동을 발생시키므로, Fig. 2와 같이 실험결과를 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다.

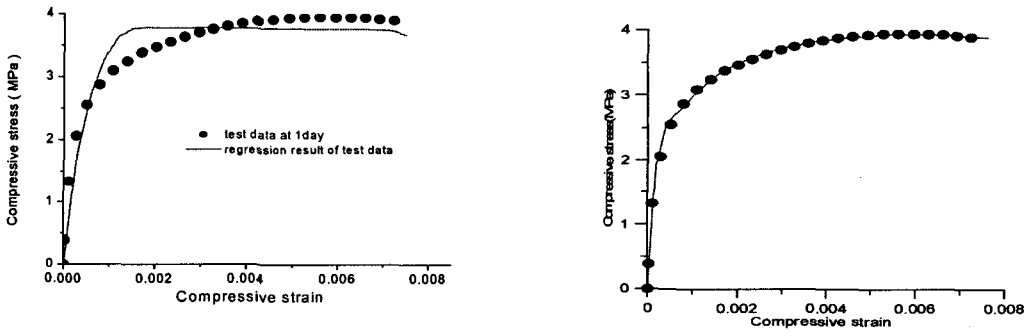
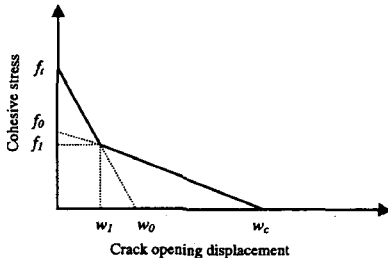


Fig. 2 α , β 에 따른 $f(\varepsilon_D)$ 의 변화

2.2 재령에 따른 인장 거동의 모사

최근 개발된 미소면 모델 M5에서는 콘크리트의 인장거동을 Fig. 3과 같은 이선형 인장연화곡선으로 모사하고 있다. 따라서 재령에 따른 인장거동특성을 해석에 반영하기 위해서는 2.1절의 압축거동과 마찬가지로 재령에 따른 네 개의 파라미터 f_t , f_l , w_l , w_c 의 값을 결정해야 한다. 재령에 따른 썩기쫂갸시험결과를 회귀분석하여 결정한 네 개의 파라미터 f_t , f_l , w_l , w_c 의 값은 Fig. 3의 표와 같다.

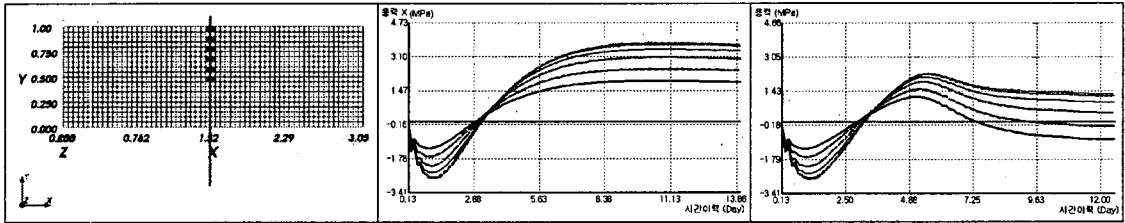


Age (days)	f_t (MPa)	f_l (MPa)	w_l (mm)	w_c (mm)
1	0.272	0.193	0.072	0.324
3	1.248	0.363	0.024	0.285
7	2.079	0.616	0.023	0.271
14	2.824	0.472	0.024	0.204
28	2.964	0.643	0.013	0.186

Fig. 3 이선형 인장연화곡선

3. 해석 예제

이 연구에서는 앞에서 개발된 재령을 고려한 미소면 모델을 기반으로 하여 Fig. 4(a)와 같은 양단이 구속된 슬래브의 균열거동을 해석하고자 하였다. 해석 대상 구조물은 두께가 1m이고, 길이가 3m인 슬래브 구조물이다. 균열발생 영향인자로 수화열을 고려하였으며, 슬래브의 상부면과 하부면으로 열이 외기로 방출되는 것으로 간주하였다.



(a) 메쉬 모델링 (b) 종방향 응력 이력(균열 없음) (c) 종방향 응력 이력(균열 발생)

Fig. 4 양단 구속된 슬래브의 수화열에 의한 균열거동 해석 결과

응력 해석결과는 대칭 구조물이므로 표면부로부터 중앙부까지를 출력하였다. Fig. 4(b)에서 보이는 바와 같이 초기에는 단면 전체에 압축응력이 발생하게 되고 표면부에서 먼저 압축응력으로부터 인장응력으로의 전환이 이루어진다. 이는 단면에 발생하는 온도가 2일경에 최대 온도에 도달하게 되고, 이후로의 온도가 감소하기 때문이다. 표면부에서는 외부로의 열방출이 활발하여 중심부보다 일찍 최대 온도에 도달하기 때문에 표면부에서 인장응력으로의 전환이 빨리 이루어지게 된다.

Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)를 비교해 보면, 균열이 발생하지 않는다고 가정한 경우에 계속적인 응력증가를 나타내는데 비해, 균열발생을 고려한 경우에는 인장강도를 초과할 경우에 균열이 발생하게 되고 인장 응력이 소산됨을 알 수 있다. 이는 탄성해석에 기반한 수화열 응력 해석 결과가 균열 발생 후, 구조물의 실제 거동을 제대로 모사하고 있지 않음을 나타내고 있다.

4. 결론

이 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 재령에 따라 물리적 특성이 변화하고 다축압 상태에 놓이는 매스콘크리트의 응력해석을 위해서 기존의 다축압 재료모델인 미소면 모델을 재령효과를 고려할 수 있도록 개선하였다.
- 2) 매스콘크리트의 수화열에 의한 응력해석 결과, 균열발생을 가정하지 않은 경우와 균열발생을 고려한 경우는 시간에 지남에 따라 매우 다른 응력 상태를 나타내며, 재령을 고려한 미소면 모델을 적용하여 매스콘크리트 구조물의 시간에 따른 균열거동을 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. and Prat, P. C., "Microplane model for brittle plastic material: I. Theory : and II. Verification" Journal of Engineering Mechanics, Vol. 114, 1988, pp. 1672-1702.
2. Bazant, Z. P., Caner, F. C., Adley, M. D. and Akers, S. A., "Microplane model M4 for concrete I", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 136, 2000, No. 9, pp. 944-953.