

콘크리트 구조물의 비선형해석을 위한 재료모델 비교연구

A Study on the Stress-Strain Relationships for Nonlinear Analysis of Concrete Structures

오 병환*, 김 영진**, 이 형준***, 홍 기중***, 박 승진**, 임 선택**

Oh, Byung Hwan, Kim, Young Jin, Lee, Hyung Joon, Hong, Gi Jeung, Park, Seung Jin, Lim, Sun Taik

ABSTRACT

Reinforced concrete and prestressed concrete structures consist of different materials, namely concrete, reinforcing steel and/or prestressing steel. Reinforcing and prestressing steels can be considered homogeneous materials, and their properties are generally well defined. However, concrete is a heterogeneous materials, and it is difficult to define its properties accurately.

Both concrete and steel exhibit various nonlinear materials properties. The stress-strain relationship of concrete is not only nonlinear, but it differs in compression and tension. And, tensile cracking is one of the most important factors which contribute to the nonlinear behavior of reinforced concrete structures.

In this study, the various stress-strain relationships of concrete and reinforcing steel in nonlinear analysis of RC and PC structures are examined.

1. 서론

철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 콘크리트와 철근 또는 PC강재로 구성된다. 철근과 PC강재는 등방성재료로 생각할 수 있고, 또한, 그들의 성질이 일반적으로 잘 정의되어 있다. 한편, 콘크리트는 모르타르와 혼합재로 구성된 이질의 재료로서 콘크리트의 성질은 많은 변수에 의존하므로 그 성질을 정확하게 정의하는 것은 매우 어렵다.

그러나, 콘크리트는 통계학적으로 그 평균적 성질을 정의한다면 균질의 등방성재료로 고려할 수 있으며, 토목구조물에 대한 이러한 가정은 일반적으로 허용되고 있다.

콘크리트, 철근 및 PC강재는 비선형성을 갖는 재료이다. 철근은 인장과 압축에 있어서 서로 대칭인 비선형 응력-변형도 관계를 나타내고, PC강재는 인장재료만 사용되는 재료로 응력-변형도 관계는 비선형성을 갖으나 철근의 응력-변형도와는 다르다. 이들 철근과 PC강재는 등방성재료로 그들의 비선형성이 일반적으로 잘 정의되어 있다. 또한, 콘크리트의 응력-변형도관계는 비선형적일 뿐만아니라 압축과 인장에 대해 성질이 서로 다르며, 콘크리

* 서울대학교 토목공학과 교수

** (주)대우 건설기술연구소

*** 서울대학교 대학원 토목공학과

트의 인장균열은 철근콘크리트 구조물의 비선형 거동에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다.

본 소고에서는 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 거동을 해석하는데 사용되고 있는 여러 형태의 재료모델을 비교하고, 실측 자료와 비교분석하여 콘크리트 구조물의 비선형해석에 적합한 재료모델을 제시하고자 한다.

2. 재료모델의 모형화

2.1 개요

철근콘크리트 구조물을 설계하거나 해석하는데 필요한 단조하중하에서의 콘크리트의 압축응력-변형도 관계에 대한 연구는 1940년대에 연구되기 시작하여 1960년대에 이르러서는 많은 모델들이 제시되었다.

본 장에서는 콘크리트의 많은 압축응력-변형도 관계중에서 많이 이용되고 있는 모델들의 특징을 고찰하며, 지수형, 다항식형 또는 다중 직선 등으로 모형화되는 콘크리트의 인장응력-변형도 관계의 특징을 고찰하고자 한다.

2.2 콘크리트의 압축모델

콘크리트 구조물의 비선형 해석을 위한 콘크리트의 응력-변형도(σ - ϵ)관계에 대한 재료 모델은 그림 1과 같이 여러가지가 있다. 콘크리트의 응력-변형도(σ - ϵ)관계에 대한 각 모델의 특징을 비교하면 다음과 같다.

- ① Linear elastic-perfectly plastic model : 가장 간단한 비선형 모델
- ② Inelastic-perfectly plastic model : 포물선과 직선으로 구성
- ③ Hognestad model : 콘크리트의 응력-변형

도 곡선의 다양성을 가장 잘 표현할 수 있는 모델로 가장 많이 사용

④ Piecewise linear model : 응력-변형도곡선의 다양성을 표시할 수 있으며, 시험자료가 있는 경우에 한정

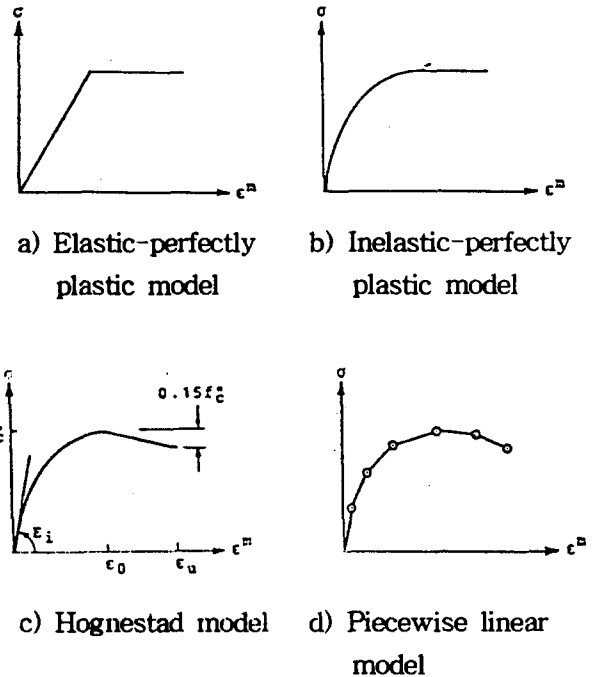


그림 1. 콘크리트의 응력-변형도 모델

(1) Hognestad 모델

Hognestad는 편심하중을 받는 기둥의 설계 및 해석을 위하여 그림 1(c)와 같은 콘크리트의 응력-변형도 관계곡선을 제시하였으며, 휨 압축하에서의 응력-변형도관계에도 많이 이용되고 있다.

- 상승부(ascending branch)

$$\sigma = \sigma_o [2 \epsilon / \epsilon_o - (\epsilon / \epsilon_o)^2]$$

- 하강부(descending branch)

$$\sigma = \sigma_o [\epsilon_u - 0.85 \epsilon_o - 0.15 \epsilon] / (\epsilon_u - \epsilon_o)$$

(2) Shalin, Smith and Young 모델

휨 압축하에서의 응력-변형도관계를 다음과 같이 지수형으로 표현하였다.

$$\sigma = \sigma_o (\varepsilon / \varepsilon_o) e^{(1 - \varepsilon / \varepsilon_o)}$$

이 모델은 실험결과에 기초한 것으로 $\sigma_o = f_c'$, $\varepsilon_o = 0.17 - 0.20\%$ 이며, 콘크리트의 압축강도가 $210\text{kg/cm}^2 - 280\text{kg/cm}^2$ 이고, 변형도가 0.25%일때까지 실험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

(3) Young 모델

$$\begin{aligned} \sigma &= (E_c \varepsilon_o - 2f_c') (\varepsilon / \varepsilon_o)^3 \\ &\quad - (2E_c \varepsilon_o - 3f_c') (\varepsilon / \varepsilon_o)^2 + E_c \varepsilon \\ \sigma &= f_c' \sin(\pi \varepsilon / 2 \varepsilon_o) \end{aligned}$$

(4) Saenz 모델

○ 상승부(ascending branch)

$$\sigma = E_c \varepsilon / [1 + (E_c / E_o - 2) (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}) + (\varepsilon / \varepsilon_o)^2]$$

○ 하강부(descending branch)

$$\sigma = \varepsilon / (a_1 + a_2 \varepsilon + a_3 \varepsilon^2 + a_4 \varepsilon^3)$$

(5) Desayi and Krishnan 모델

$$\sigma = \frac{E \varepsilon}{1 + (\varepsilon / \varepsilon_o)^2}$$

이 모델은 콘크리트의 압축강도가 $f_c' = 4,000\text{psi}$ 근처에서는 실험결과와 잘 일치하고, 그 이상의 압축강도에서는 상승부에서 많은 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다.

(6) Liebenberg 모델

$$\sigma = E_c \varepsilon - a \varepsilon^{m+1}$$

○ 하강부(descending branch)

$$\sigma = \sigma_o [\varepsilon_u - 0.85 \varepsilon_o - 0.15 \varepsilon] / (\varepsilon_u - \varepsilon_o)$$

$$\varepsilon_u (\%) = 0.4 - f_c' / (6.5 \times 10^4)$$

(7) Kent and Park 모델

이 모델은 휨방향의 구속정도에 따른 응력-변형도 곡선의 하강부 영향을 고려할 수 있으며, 응력-변형도관계는 그림 2와 같이 3 단계로 구성된다.

○ 구간 AB, $\varepsilon_c \leq 0.002$

$$f_c = f_c' [2 \varepsilon / 0.002 - (\varepsilon / 0.002)^2]$$

○ 구간 BC, $0.002 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{2\sigma}$

$$f_c = f_c' [1 - z(\varepsilon_c - 0.002)]$$

○ 구간 CD, $\varepsilon_c > \varepsilon_{2\sigma}$

$$f_c = 0.2 f_c'$$

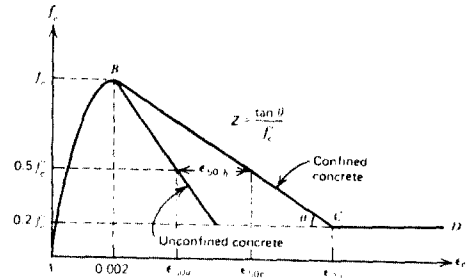


그림 2. 휨방향 구속된 콘크리트의 응력-변형도 관계

2.3 콘크리트의 인장 모델

콘크리트의 인장 응력-변형도 관계는 균열이 발생하기 전까지는 직선으로 표현하고, 균열이 발생한 이후에는 그림 3과 같이 지수형 및 다항식 형태의 곡선 또는 다중 직선으로 구성한다.

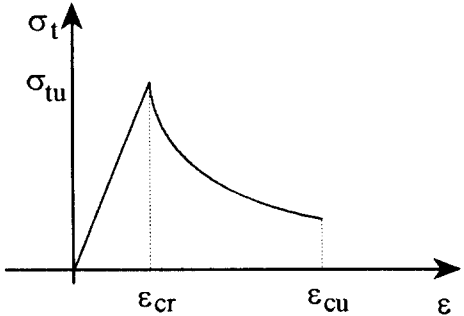
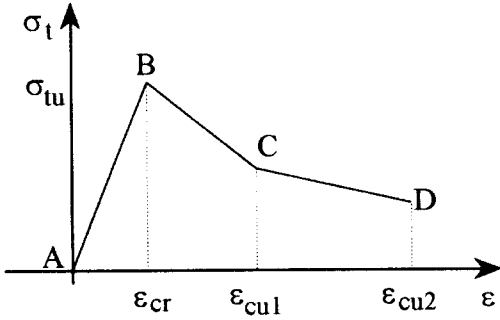


그림 3. 콘크리트의 인장응력-변형도 관계

(1) Hilerberg

이 모델은 최대 인장응력 이후의 거동은 다중 직선(그림 3(a))으로 표현된다.

○ 상승부(AB구간)

$$\sigma_t = E_c \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr}$$

○ 하강부(BC구간), $\varepsilon_{cr} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu1}$

$$\sigma_t = f_t \frac{(\varepsilon_{tu1} - \varepsilon_{cr}/3 - 2\varepsilon_t/3)}{(\varepsilon_{tu1} - \varepsilon_{cr})}$$

○ 하강부(CD구간), $\varepsilon_{tu1} < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu2}$

$$\sigma_t = \frac{f_t}{3} \frac{(\varepsilon_{tu2} - \varepsilon_t)}{(\varepsilon_{tu2} - \varepsilon_{tu1})}$$

(2) Petersson 모델

하강부의 형태를 지수형으로 표현한다.

$$\sigma_t = \sigma_{tu} \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cu}}{\alpha}\right) \right]$$

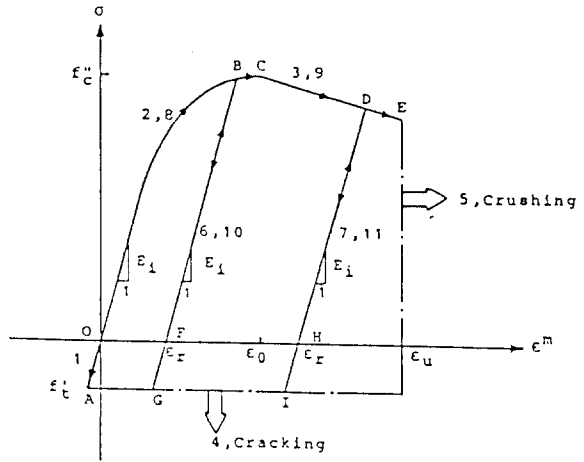
(3) SPCFRAME 모델

최대응력 이후의 거동을 하나의 다항식으로 표현한다.

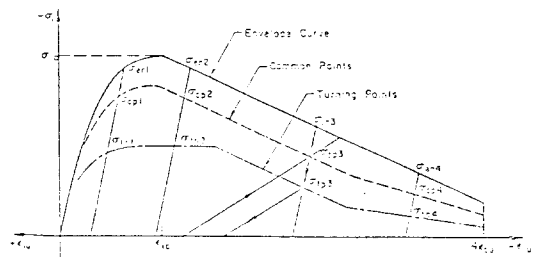
$$\sigma_t = f_t' \left[a_0 + a_1 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \right) + a_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \right)^3 \right]$$

2.4 콘크리트의 반복하중 모델

반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형도 관계는 재하중이나 하중제거 경로를 콘크리트의 초기 탄성계수와 같게하여 계산의 편리를 도모하는 방법(그림 4(a))과 반복재하에 따른 강성의 저하를 고려한 즉, Bauschinger 효과를 고려한 모델(그림 4(b))로 구분할 수 있다.



(a) 하중경로를 직선으로 가정한 경우



(b) Bauschinger 효과를 고려한 경우

그림 4. 반복하중하에서의 응력-변형도 관계

3. 철근의 응력-변형도 관계

철근은 탄성구간과 소성구간의 구분이 뚜렷하게 나타나는 재료로서 변형경화(strain hardening)를 고려하기 위하여 다중선형으로 응력-변형도 관계를 나타내는 방법과 변형경화를 나타내기 위하여 소성구간을 포물선으로 나타내는 방법 등이 있다(그림 5).

또한, 반복하중하에서의 응력-변형도 관계는 탄성-완전소성 표현하는 방법과 Bauschinger 효과를 고려한 모델로 구분할 수 있다(그림 6).

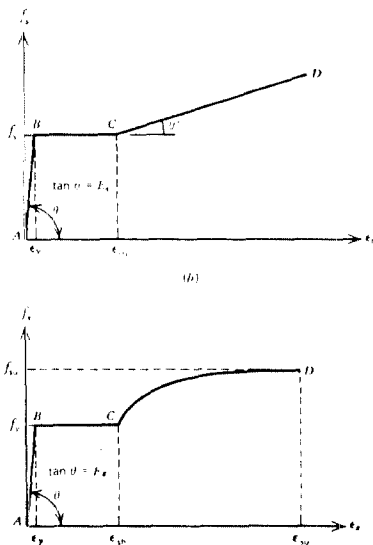


그림 5. 철근의 응력-변형도 관계

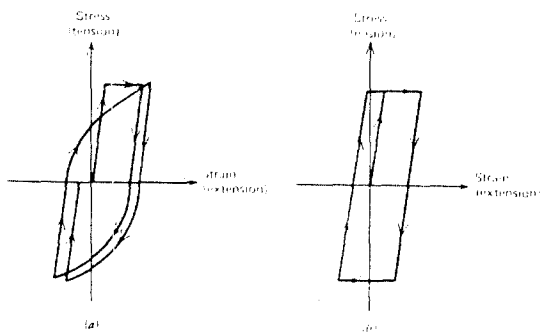
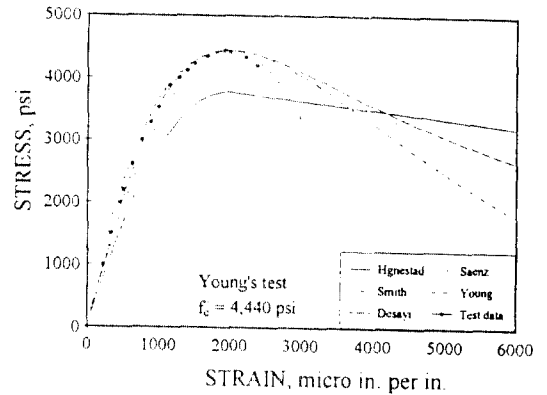


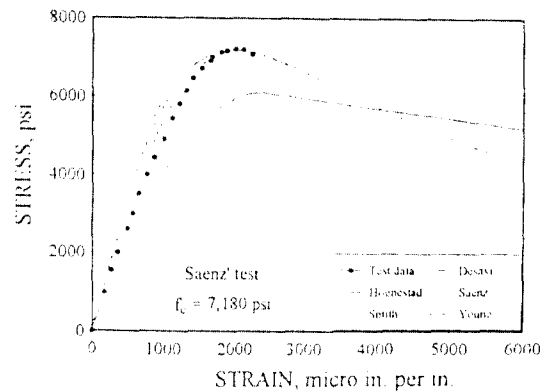
그림 6. 반복하중하에서의 철근 응력-변형도 관계

4. 실험결과와의 비교

콘크리트의 일축 압축실험으로부터 얻은 압축응력-변형도관계를 각 모델별로 비교하면 그림 7과 같다. 각 모델은 초기 상승부의 거동은 큰 차이를 보이지 않으나 하강부의 거동은 각 모델에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 또한, 상승부의 거동은 Saenz의 모델이 실험결과에 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.



(a) $f_c' = 4,440$ psi 인 경우



(b) $f_c' = 7,180$ psi 인 경우

그림 7. 실험결과와의 비교

5. 결론

본 소고에서는 철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 거동을 해석하는데 사용되고 있는 여러 형태의 재료모델을 비교하고, 실측 자료와 비교분석하여 콘크리트 구조물의 비선형해석에 적합한 재료모델을 제시하고자 하였다.

철근콘크리트 구조물의 비선형 해석을 위해 이용되는 재료모델은 각 재료의 거동을 가장 잘 표현할 수 있는 모델의 선택이 중요하며, 특히 콘크리트는 균열의 발생이 구조물의 비선형 거동에 상당한 영향을 미치므로 콘크리트의 인장거동에 대한 적절한 모델의 선정이 바람직한 것으로 사료된다.

또한, 반복하중하에서의 응력-변형도 관계는 반복재하에 따른 강성의 저하를 고려할 수 있는 재료모델을 이용하여야만 비교적 정확하게 구조물의 비선형 해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Young, L.E., "Simplifying Ultimate Flexural Theory by Maximizing the Moment of the Stress Block," ACI Journal, Vol.57, No.5, 1960, pp.549-556.
2. Desayi, P., and Krishnan, S., "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete," ACI Journal, Vol.61, No.3, 1964, pp.345-350.
3. Hogestad, E., "Configuration of inelastic Stress Distribution in Concrete," Proceedings, ASCE, V. 83, St 2, March, 1957
4. Darwin D., and D.A.W. Pecknold,

- "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete," Univ. Ill. Civ. Eng. Stud. SRS 409, July, 1974.
5. Saenz, L.P., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete by Desayi and Krishnan," J. ACI., Vol 61, Sept. 1964, pp.1229-1235
6. Young-Jin Kang, "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames", Report No. UCB/SESM 77-1, Jan. 1977
7. Young-Jin Kang, "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames," Report No. UCB/SEMM 89/07.