초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안

Proposed New Model for the Stress-Strain Relationship of Ultra High-Strength Concrete

박훈규* 이장화** 윤영수*** 장일영****
Park, Hoon Gyu Lee, Jang Hwa Yoon, Young Soo Jang, Il Young

Abstract

This paper presents the newly developed model for the stress-strain relationship of ultra high-strength concrete on the basis of the more refined statistical technique to analyse the various test results available in the literature to be more rigorous in accuracy and generalized scheme.

Through the comprehensive analysis of the previously existing equations for each model, multiple curves equation has turned out to be most appropriate to simulate the linearly varying ascending branch and brittle type of descending one. The principal variables to model the stress-strain relationship such as the modulus of elasticity, ultimate strain and deformation characteristics due to stress softening phenomenon were extensively studied to be simplified in the function of the concrete compressive strength.

1. 서 론

보통강도 콘크리트와 비교하여 고강도 및 초고강도 콘크리트의 경우 어느 모델식을 사용하느냐에 따라서 구조물의 해석 및 거동(특히 재료의 비선형성을 고려한 유한요소해석)에 미치는 영향은 매우 심각할 것이 예상된다. 지금까지 발표된 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델식의 대부분은 개인적인 실험결과를 적당한 수식과 통계적 기법을 이용하여 모델화하는 방법, 그리고 기존 보통강도 모델식을 이용 최대응력점과 구배를 수정하여 고강도 및 초고강도 콘크리트까지 확장 응용하는 방법으로 크

* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구실장
*** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
**** 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

게 대별될 수 있다. 그러나 압축강도 범위, 모델의 간략화 방법 차이 및 실험방법의 차이 등의 다양한 요인에 의해서, 일반적이며 동시에 정확성을 갖춘 모델과는 거리가 있는 것으로 사료된다. 따라서 접근방법 및 개인적 불확실요소를 최소화하여 보다 일반적인 모델을 제시하기 위해서는 다양한 실험 결과를 바탕으로 이에 대한 합리적 통계적 기법을 수행하여야 할 것이다.

본 연구에서는 초고강도 콘크리트 응력-변형률 거동에 대한 기존의 다양한 실험자료를 근거로 하여, 합리적인 확률 개념을 도입하여 일반성과 정확성을 동시에 갖춘 모델을 제시하고자 한다.

2. 초고강도 콘크리트에 적합한 응력-변형률 모델의 형상 및 변수의 정량화

참고문헌(1)에서 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안을 위해 기존의 실험결과 및 모델식들을 근거로 모델의 이상적 형상 및 매개변수들에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 응력상승부에서는 확정곡선 형태, 그리고 응력하강부에서는 지수식의 형태가 가장 합리적인 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 그 결과를 바탕으로 일축 압축하에서의 초고강도 콘크리트에 대한 응력-변형률 관계곡선 모델 형상을 식(1), (2)의 가변 복수곡선식으로 표현하였으며, 그림 1과 같다.

$$f = f_c'[1-(1-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})^A] \qquad for \quad 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_0 \tag{1}$$

$$f = \exp[-k(\varepsilon-\varepsilon_0)^{1.15}] \qquad for \quad \varepsilon > \varepsilon_0 \tag{2}$$

여기서, f_c' : 콘크리트 최대압축응력, ε_0 : 최대압축응력시 변형률

A, k : 곡선의 형태를 결정하는 상승곡선 및 하강곡선 변수

식(1)은 Hognestad[2]가 편심하중을 받는 기둥의 설계 및 해석을 위하여 상승곡선 변수 A=2 즉, 초기탄성계수가 최대압축강도에 대한 할선탄성계수(f_c'/ε_0)의 2배라는 가정하에서 제시된 것으로, Fafitis and Shah[3], 野口[4], 白井[5], 김진근[6] 등이 고강도 콘크리트에 대한 실험을 토대로 $A = E_c\,\varepsilon_0 / f_c'$ 를 적용하여 강도가 증가할수록 A→1이 되는 가변곡선식의 형태이다. 또한 해석적으로 정확한 콘크리트의 응력-변형률 거동을 모델화 하기 위해서는 주요변수들 즉, 최대압축응력과 최대압축응력시의 변형률, 탄성계수, 변형률 연화구간내 한점에서의 응력과 변형률에 대한 정량적 특성파악이 필요하다. 본 연구에서는 초고강도 콘크리트에 대한 기존의 많은 실험자료를 근거로 하여 이러한 변수들에 대한 정량적 특성파악을 수행하였다.

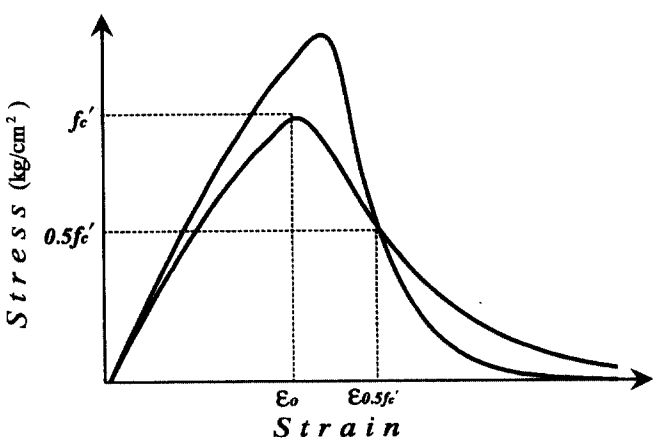

그림 1 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 제안모델

2.1 탄성계수

콘크리트의 탄성계수는 각 구성재료의 탄성특성과 체적비, 굵은골재와 시멘트 페이스트 사이의 부착강도, 혼화재료의 사용량, 양생방법 및 습윤상태, 재하속도 등의 많은 변수들에 의해 영향을 받으므로, 콘크리트의 탄성적 특성을 명확하게 규명하여 하나의 식으로 수식화하는 것은 매우 어렵다. 그러나 일반적으로 실용적 측면에서 측정이 용이한 단위중량과 압축강도만의 함수로서 다음과 같이 간략하게 정의 하고 있다[7]

$$E_c = a((f_c' + b)^c + d) \cdot r_c^e \qquad (3)$$

E_c : 탄성계수 추정치, a, b, c, d, e : 회귀상수

f_c' γ_c : 콘크리트 압축강도 및 단위중량 측정값

실험자료를 바탕으로 식(3)의 형태로서 다중회귀분석을 수행하여 식(4)의 탄성계수 추정식을 도출하였다[7]. 그림 2는 콘크리트의 단위중량에 따른 탄성계수와 압축강도와의 관계를 도시한 것이다.

$$E_c = (10{,}000\sqrt{f_c'} + 73{,}000) \cdot (\frac{\gamma_c}{2.40})^{1.5} \qquad (4)$$

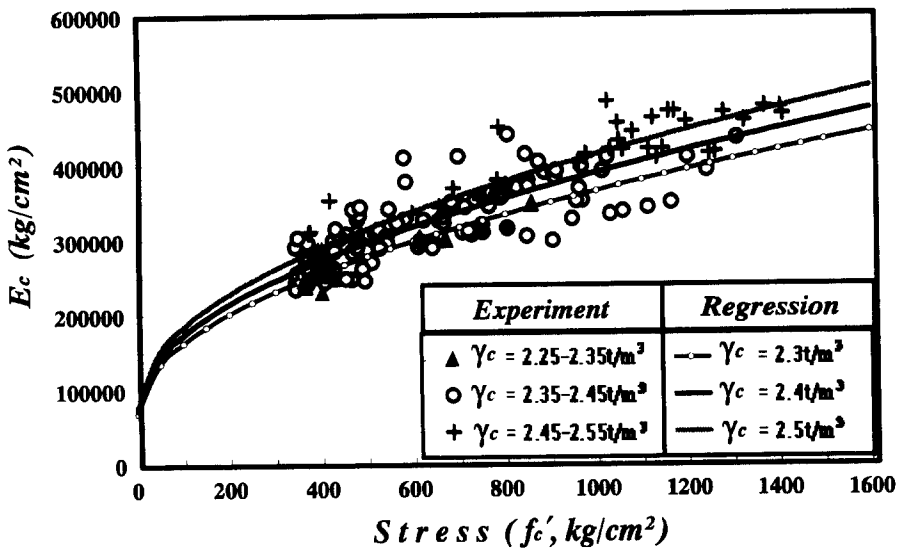

그림 2 고강도 콘크리트에 대한 압축강도와 탄성계수 관계

2.2 최대압축응력(f_c')시 변형률(ε_0)

최대압축응력시의 변형률은 응력-변형률 곡선에 있어서 상승부와 하강부를 결정하는 중요한 경계요소이며, ε_0는 f_c'에 의존하는 변수로서 기존의 실험자료[8]~[13]를 근거로 회귀분석을 수행하여 다음과 같이 수식화 하였다.

$$\varepsilon_0 = 0.00208 + 1.16 \times 10^{-6} f_c' \quad (5)$$

표 1 최대압축응력과 최대압축응력시 변형률과의 관계

분 류	회귀관계식	상관계수
전 체	$\varepsilon_o = 0.00208 + 1.16 \times 10^{-6} f_c'$	0.73
Φ10×20cm, 외국실험치	$\varepsilon_o = 0.00212 + 1.12 \times 10^{-6} f_c'$	0.68
Φ10×20cm, 국내실험치	$\varepsilon_o = 0.00203 + 1.37 \times 10^{-6} f_c'$	0.80
Φ15×30cm, 외국실험치	$\varepsilon_o = 0.00163 + 1.36 \times 10^{-6} f_c'$	0.85

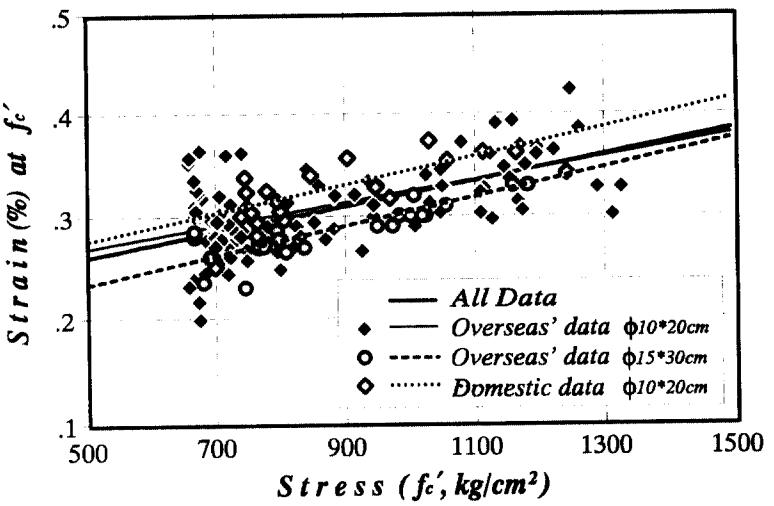

그림 3 최대압축강도시 변형률 비교

그림 3에서 콘크리트 원주공시체의 크기에 따른 최대압축응력시 변형률이 변화가 있음을 볼 수 있다. 그러나 Φ10×20cm에 비해 Φ15×30cm의 압축강도가 약 5%정도 작음을 고려한다면 실제로는 원주공시체의 크기에 따른 ε_0의 차이는 없는 것으로 사료되며, 野口의 실험결과[4]도 이것을 입증하고 있다.

또한 그림 3에서 동일한 크기의 공시체에 대한 국내의 실험치가 외국에 비해 다소 큰 값으로 나타남을 볼 수 있는데, 이것은 기존의 연구결과[7]에서 언급된바 있는 국내의 탄성계수값이 외국에 비해 다소 낮게 나타난다는 연구결과와 무관하지 않은 것으로 보여 초고강도 콘크리트에 압축강도 시험방법에 대한 평가가 있어야 할 것으로 사료된다. (그림 3)

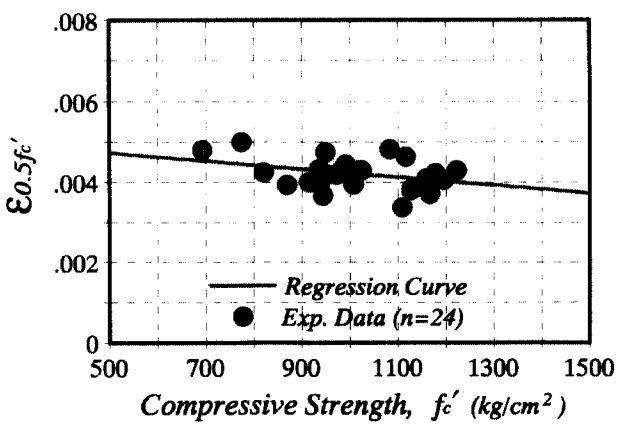

그림 4 초고강도 콘크리트의 응력연화시 변형특성

2.3 변형률 연화구간내 한점에서의 응력과 변형률

구속되지 않은 콘크리트는 압축강도가 증가할수록 취성적이어서 응력-변형률 하강 거동이 급경사를 이루게 된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 본 연구에서는 Cusson[14], 岡本[15], MacGregor[16] 및 野口[4]의 실험자료를 이용하여 Kent[17]가 Roy의 방법을 근거로 응력-변형률 하강곡선의 모델화에 적용한바 있는 최대압축

응력의 50% 지점에서의 연화거동($\varepsilon_{0.5f_c'}$)을 최대압축응력의 함수로써 표현하였다.

그림 4는 콘크리트 최대압축응력에 따른 $\varepsilon_{0.5f_c'}$ 의 변화를 도시한 것이다.

$$\varepsilon_{0.5f_c'} = 0.00516 - 7.82\times10^{-7} f_c'$$

2.4 상승곡선 형상변수 A

제안된 응력-변형률 곡선의 상승곡선식의 형태는 변수 A에 따라 좌우된다. A=1.0 (또는 $f_c'/\varepsilon_0 \simeq E_{it}$)일 때 완전 탄성재료가 되며, 또한 이 값이 증가할수록 곡선은 더욱 비선형적이 되며, 이 값은 할선비(일반적으로 0.4)를 고려하여 다음의 조건에 따라 결정되어질 수 있다.

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \frac{0.4}{E_c/(f_c'/\varepsilon_0)} \quad \rightarrow f/f_c' = 0.4\text{로 부터,} \tag{7}$$

$$A = \frac{ln(1-0.4)}{\ln(1-\frac{0.4f_c'}{E_c\varepsilon_0})}$$

일반적으로 설계 및 해석시 사용되어지는 탄성계수식은 할선 탄성계수를 근거로한 것이므로 응력-변형률 모델의 일반적인 적용을 위해서는 식 (7)에 따라 A의 값을 산정하여야 한다. 따라서 앞에서 제안된 변수들(E_c, ε_0)을 이용하여 응력-변형률 모델의 상승곡선 변수, A의 값은 다음과 같이 간략하게 표현되어진다.

$$A = \left[\frac{E_c\varepsilon_0}{f_c'}\right]^{1.243} = \frac{1.18f_c'}{f_c'-181.6} \tag{8}$$

위 식에서 A값은 압축강도의 증가에 비례하여 감소한다. 이것은 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 더욱 직선적인 상승역의 거동 표현에 적합한 것으로 보인다.

2.5 하강곡선 형상변수 k

응력-변형률 하강곡선의 형태를 결정하는 k값은 대체로 압축강도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 다음 경계조건과 식(6)을 적용하여 식(9)와 같이 표현된다.

$f = 0.5f_c' \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_{0.5f_c'}$ 로 부터

$$k = -\frac{\ln 0.5}{(\varepsilon_{0.5f_c'} - \varepsilon_0)^{1.15}} = 100.4\exp(0.00285f_c')$$

3. 응력-변형률 제안모델 비교

다음의 그림 5에서는 MacGregor 실험결과[16]를, 그림 6은 野口의 실험결과[4]를 각각 본 연구에서

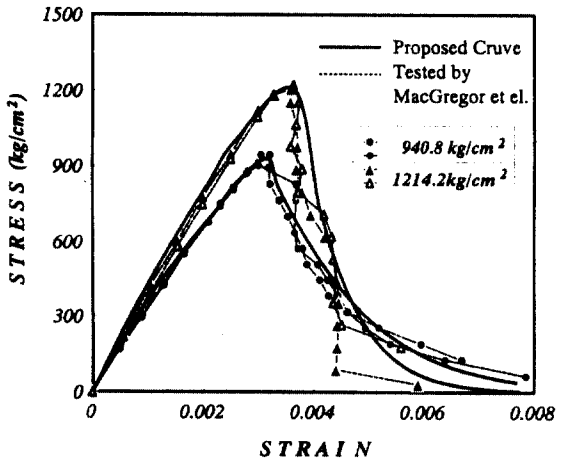

그림 5 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 실험치[16]와 제안모델 비교

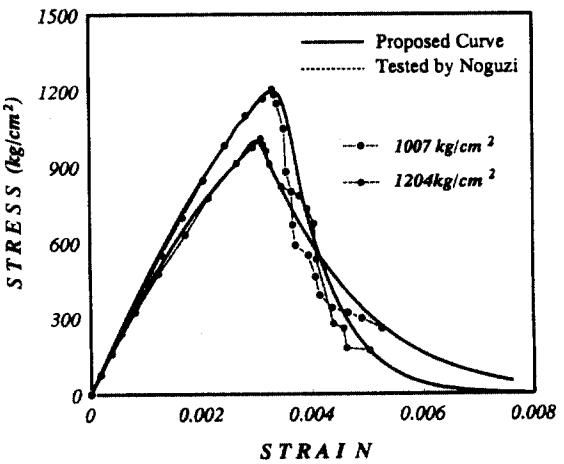

그림 6 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 실험치[4]와 제안모델 비교

제안된 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계 곡선식과 비교하였으며, 제안식에 의한 관계곡선이 실험결과를 정확히 예측함을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 식(1)과 식(2)와 같은 간결한 형태의 가변곡선식으로 이론적 상승곡선식 및 하강곡선식을 제시하였으며, 다양한 실험결과와 비교하여 응력-변형률 거동 전반에 걸쳐 정확히 예측하는 것으로 나타났다.
2) 응력-변형률관계 모델과 더불어 탄성계수식(식(4)), 최대압축강도시 변형률 추정식(식(5))을 통계적기법을 사용하여 제안하였으며 초고강도 콘크리트 구조물의 설계 및 해석시 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박훈규 외 3인, "콘크리트의 응력-변형률 모델 비교 평가 연구", 한국 콘크리트학회 학술발표회, 1997.5.
2. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members", Bulletin No. 399, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, Nov. 1951, pp.128.
3. A. Fafitis, and S. P. Shah, "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Column," ACI 363 SP-87 High Strength Concrete Symposium, 1985, pp.213-232.
4. 野口貴文, 高强度コンクリートの基礎的力學特性に關する研究, 東京大學, 博士論文, 1995. 3.
5. 건설교통부, 국내 실정에 맞는 고강도 콘크리트의 개발 및 실용화 연구, R&D/94-0015, 1995.10.
6. 김진근, 이태규, 서용표, "횡보강효과를 고려한 콘크리트의 응력-변형도 관계", 한국콘크리 트학회 학술발표논문집, 제2권1호, 1990, pp.116-121.
7. 장일영 외 3인, "국내 실정에 적합한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄 성계수식 제안", 한국콘크리트학회 학

술발표회 논문집, 제8권2호, 1969.11, pp.245-250.
8. Ekasit, L., "Strength of High-Strength Concrete Columns", Proceedings International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Lillehammer, Norway, June 1993, pp.277-284.
9. Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads", ACI, Vol.78,No.3, 1991, pp.171-178.
10. 張一泳, 石黑 直, "超高强度コンクリートの基礎的特性に關する研究", 東北大學工學部土 木工學科, 構造工學研究室, 平成2年(1991年)3月.
11. 友澤史紀, 野口貴文, 小野山貫造, "高强度コンクリートの應力-ひずみ曲線に及ぼす粗骨材 種類の影響", 弟46回セメント技術大會講演集, 1992, pp.890-895.
12. 김진근, 박찬규, 박연동, "고강도 콘크리트의 재료역학적 특성 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권2호, 1992.11, pp.111-118.
13. 國土開發技術研究センター, 平成4年度高强度コンクリート分科會報告書, 1-2 高强度超高强 度コンクリート用骨材の開發, 1-3 高强度 · 超高强度コンクリート用骨材の開發, 4-4-1~ 4-8-10, 平成5年3月.
14. Cusson, D., and Paultre, P., "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.120, No.ST3, March, 1994., pp.783-804.
15. 岡本 伸, 柳下文夫, "高强度コンクリートの應力-ひずみ特性", コソクリート工學年次論文報告集, Vol.14, No.3, 1976, pp.42-46.
16. Xie, J., Elwi, A. E., and MacGregor, J. G., "Mechanical Properties of Three High Strength Concrete Containing Silica Fume", ACI Materials Journal, Vol.92, No.2, March- April, 1995, pp.135-145.
17. Kent, D. C., and Park, R., "Flexural Member with Confined Concrete," Proceeding of ASCE, Vol.197, ST7, July 1971, pp.1969-1991.