

초고강도 콘크리트에 적합한 응력-변형을 모델과 응력분포 모델의 제안

A Proposal of New Model for Stress-Strain Relationship
and Stress Distribution of Ultra High-Strength Concrete



장일영*

Jang, Il Young



박훈규**

Park, Hoon Gyu

ABSTRACT

The major objects of this study is to develop the analytical model for the stress-strain relationship and the stress distribution of ultra high-strength concrete

For this propose, this study collected the other analytical results and the experimental data and also analyzed it stastically. And the major variables to the stress-strain relationship such as the modulus of elasticity, strain at maximum stress and ultimate strain were intensively studied.

From the results of this investigation, the following conclusions are drawn:

1. The stress-strain relationship model of ultra high-strength concrete has been proposed and compared well with the present experimental results.
2. The equivalent trapezoidal stress distribution model appropriate to predict the ultimate strength of structural elements using ultra high-strength concrete was suggested and evaluated.

Keywords : ultra high-strength concrete, stress-strain relationship, stress distribution model, trapezoidal stress distribution model

* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

보통강도 콘크리트와 비교하여 초고강도 콘크리트의 경우 어느 응력-변형률 모델식을 사용하느냐에 따라서 구조물의 해석 및 거동(특히 재료의 비선형성을 고려한 유한요소해석)에 미치는 영향은 매우 심각할 것이 예상된다. 또한 기존의 등가 직사각형 응력분포 모델의 단순성은 거의 직선적으로 증가하는 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 특성을 표현하기에는 비현실적이다. 휨을 받는 부재의 극한시 단면 도심층의 높이의 증가나 압축연단으로의 응력증가 정도는 저강도 콘크리트에 비해 더욱 큰 초고강도 콘크리트일 수록 응력 중심간의 거리는 증가하게 됨을 알 수 있으나, ACI-318¹⁾은 등가 직사각형 응력분포 모델 계수 β_1 을 0.65로 제한하고 있어서 콘크리트 압축강도가 530kg/cm^2 을 초과할 경우 응력 중심간의 거리의 증가비가 작아지게 되므로 내력모멘트가 과대평가될 우려가 있어 초고강도 콘크리트의 압축 응력분포형태에 적합한 응력분포 모델 계수를 새로이 정립할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 초고강도 콘크리트에 적합한 응력-변형률 모델식을 정립하여야 한다. 지금까지 발표된 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델식의 대부분은 개인적인 실험결과를 적당한 수식과 통계적 기법을 이용하여 모델화하는 방법. 그리고 기존 보통강도 모델식을 이용 최대응력점과 곡선 기울기를 수정하여 고강도 및 초고강도 콘크리트까지 확장 응용하는 방법으로 크게 대별될 수 있다. 그러나 압축강도 범위, 모델의 간략화 방법 차이 및 실험방법의 차이 등의 다양한 요인에 의해서, 일반적이며 동시에 정확성을 갖춘 모델로 평가하기에는 곤란하다. 따라서 접근방법 및 개인적 불확실성 요소를 최소화하여 보다 일반적인 모델을 제시하기 위해서는 다양한 실험 결과(검증된 결과)를 바탕으로 합리적 통계기법을 수행하여야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 다양한 초고강도 콘크리트에 대한 실험자료를 근거로 합리적인 통계기법을 이용하여 초고강도 콘크리트의 설계 실용화를 위한 설계규준 마련을 목적으로 우선, 콘크리트의 응력-변형률 특성을 결정하는 재료 변수들 즉 탄성계수, 최대 압축강도시 변형률 등에 대한 검토를 수행하고 이를 바탕으로 일반성과 정확성을 동시에 갖춘

초고강도 콘크리트($700 \sim 1400\text{kg/cm}^2$)에 적합한 응력-변형률 모델을 제안, 비교 고찰하였다. 또한 제안된 응력-변형률 모델로부터 초고강도 콘크리트 구조의 극한강도평가에 적합한 응력분포 모델을 제시하므로써 급후 초고강도 콘크리트 구조물의 설계 및 해석 비교 검증 시스템 개발에 도움이 되고자 한다.

2. 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안

초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안을 위해 Table 1과 같은 대표적인 기존의 상승곡선식과 하강곡선식들에 대해 최근에 고강도 콘크리트에 대해 제시한 ACI-363²⁾ "탄성계수식과 정"의 최대압축강도시 변형률 추정식, Ahmad³⁾의 하강곡선 임의의 점에 대한 추정식들을 적용하여 모델의 이상적 형상 및 매개변수들에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 상승부거동은 여러 모델식 중 Model-1 형태의 가변곡선식이, 하강부거동에 있어서는 Model-7 형태의 지수식이 식의 간결성이나 실험치와의 적합성면에서 가장 적절한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 그 결과를 바탕으로 일축 압축하에서의 초고강도 콘크리트에 대한 응력-변형률 관계곡선 모델을 식(1), (2)와 같이 응력상승부와 하강부로 분리한 가변 복수곡선식으로 표현하였으며, Fig.1과 같다.

$$f = f_c' [1 - (1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_0})^A] \quad \text{for } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

$$f = f_c' \exp[-k_1(\epsilon - \epsilon_0)^{k_2}] \quad \text{for } \epsilon > \epsilon_0 \quad (2)$$

여기서, f_c' : 콘크리트 최대압축강도

ϵ_0 : 최대압축강도시 변형률

A : 상승곡선 형상계수

k_1, k_2 : 하강곡선 형상계수

식(1)과 식(2)에 의한 상승곡선과 하강곡선은 곡선의 경사가 $0(df/d\epsilon = 0)$ 인 $\epsilon = \epsilon_0$, $f = f_c'$ 점에서 서로 만나 하나의 완전한 응력-변형률 관계 곡선이 된다.

식(1)은 Hognestad⁴⁾가 편심하중을 받는 기둥의 설계 및 해석을 위하여 상승곡선 형상계수를 $A = 2$ 즉, 초기탄성계수가 최대압축강도에 대한 항선탄성

Table 1 Representative equation of stress-strain diagram of concrete

Name	Equations for ascending part	Researchers(year)	Name	Equations for descending part	Researchers(year)
Model 1	$Y = 1 - (1 - X)^n$	Hognestad(1951)	Model 4	$Y = 1 - \tan \theta(X - 1)$	Suzuki et al.(1978)
		Kent and Park(1971)			
		Suzuki et al.(1978)	Model 5	$Y = \frac{\beta X}{\beta - 1 + X^\beta}$	Desayi and Krishnan(1964)
Scott et al.(1982)					
Model 2	$Y = \frac{\beta X}{\beta - 1 + X^\beta}$	Fafitis(1985)	Model 6	$Y = \frac{AX + (B-1)X^2}{1 + (A-2)X + BX^2}$	Sargin(1971)
		Noguchi(1993)			
		Desayi and Krishnan(1964)			
		Popovics(1971)			
		Mander et al.(1984)			
Model 3	$Y = \frac{AX + (B-1)X^2}{1 + (A-2)X + BX^2}$	Mander et al.(1984)	Model 7	$Y = \exp[-k(\epsilon - \epsilon_0)^{1.15}]$	Fafitis(1985)
		Tanikawa et al.(1989)			
		Collins et al.(1991)			
		Saenz(1964)			
		Sargin(1971)			
		Wang et al.(1978)			
		Ahmad(1980)			
Tomaszewicz(1990)					
Sun et al.(1993)					

Note: $X = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$; $Y = \frac{f}{f_c}$; f_c = compressive strength of concrete(kg/cm²);
 ϵ_0 = strain at maximum concrete stress f_c

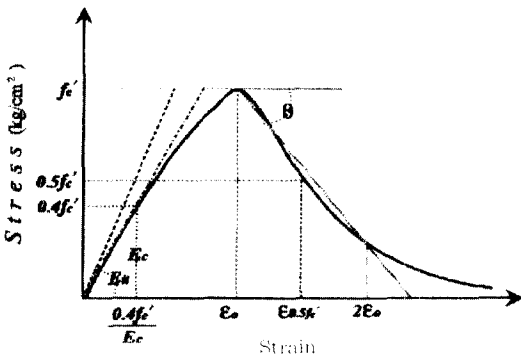


Fig. 1 Stress-strain model proposed for ultra high-strength concrete

계수 (f_c' / ϵ_0)의 2배라는 가정하에서 제시된 것으로, Fafitis⁶⁾, 野口⁷⁾, 김등⁸⁾ 등이 보통강도 및 고강도 콘크리트에 대한 실험을 토대로 콘크리트의 탄성계수 (E_c)를 종속변수로 하는 $A = E_c \epsilon_0 / f_c'$ 를 적용하여 강도가 증가할수록 $A \rightarrow 1$ 이 되어 직선이 되는 가변곡선식으로 수정하여 제시하였다.

식(2)의 지수식은 1985년 Fafitis⁶⁾가 항복강력을 받는 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험을 바탕으로 이론적으로 제안하였다. 이 때의 k_2 값은 1.15로 확장하였으나, 최근 김등(8)과 Cusson등

⁹⁾은 항복강된 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험자료를 분석하여 k_2 를 압축강도의 함수로 표현하여 좀 더 실제 기둥에 접근하고자 하였다.

2.1 탄성계수 (E_c)

압축강도 400~1200kg/cm²에 대한 실험자료를 바탕으로 다중회귀분석을 수행하여 식(3)의 탄성계수 (E_c) 추정식을 도출하였으며¹⁰⁾, Fig. 2는 콘크리트의 단위중량(γ_c)에 따른 탄성계수와 압축강도와의 관계를 도시한 것이다.

$$E_c = (10,000 \sqrt{f_c'} + 73,000) \cdot \left(\frac{\gamma_c}{2.40}\right)^{1.5} \quad (3)$$

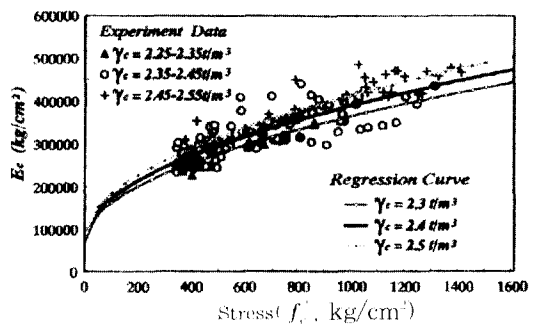


Fig. 2 Relationship between modulus of elasticity and compressive strength on unit weight of concrete (γ_c)

2.2 최대압축강도(f'_c)시 변형율(ϵ_0)

최대압축강도시의 변형율은 응력-변형율 곡선에 있어서 상승부와 하강부를 결정하는 중요한 경계요소이며, ϵ_0 는 f'_c 에 의존하는 변수로서 압축강도 700~1200kg/cm²에 대한 기존의 실험자료를 근거로 회귀분석을 수행하여 다음과 같이 수식화 하였다¹¹⁾.

$$\epsilon_0 = 0.00208 + 1.16 \times 10^{-6} f'_c \quad (4)$$

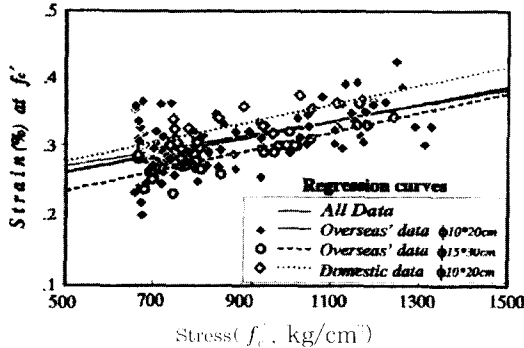


Fig.3 Strain at peak uniaxial compression for ultra high-strength concrete

2.3 하강곡선내 한점에서의 응력과 변형율

본 연구에서는 野口¹²⁾, Cusson등¹³⁾, 岡本등¹⁴⁾ 및 MacGregor등¹⁵⁾의 실험자료를 이용하여 최대압축강도의 50%지점에서의 연화거동($\epsilon_{0.5f'_c}$)을 최대압축강도의 함수로써 표현하였다. Fig.4는 콘크리트 최대압축강도에 따른 $\epsilon_{0.5f'_c}$ 의 변화를 도시한 것이다.

$$\epsilon_{0.5f'_c} = 0.00516 - 7.82 \times 10^{-7} f'_c \quad (5)$$

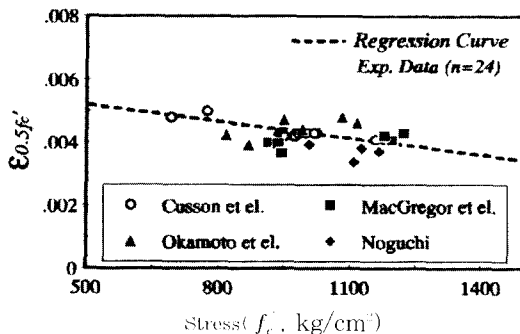


Fig.4 Descending branch property of ultra high-strength concrete

2.4 상승곡선 형상계수(A)

제안된 응력-변형율 상승곡선식의 곡선경사와 곡률은 형상계수 A에 따라 좌우된다. 이 값은 활선탄생계수의 활선비(일반적으로 0.4)를 고려하여 다음의 응력-변형율 상승부 곡선에 대한 경계조건에 따라 결정된다. 일반적으로 설계 및 해석시 사용되어지는 탄성계수식은 활선탄생계수를 근거로한 것이므로 응력-변형율 모델의 일반적인 적용을 위해서는 앞에서 제안된 변수들(E_c, ϵ_0)을 이용한 식(6)에 따라 A의 값을 산정하여야 한다.

$$\begin{aligned} \epsilon / \epsilon_0 &= \frac{0.4}{E_c (f'_c / \epsilon_0)} \rightarrow f / f'_c = 0.4 \text{로부터,} \\ A &= \frac{\ln(1-0.4)}{\ln(1 - \frac{0.4 f'_c}{E_c \epsilon_0})} = 0.95 + \frac{390.6}{f'_c} \end{aligned} \quad (6)$$

2.5 하강곡선 형상계수(k_1, k_2)

응력-변형율 하강곡선의 하강기울기와 곡률은 각각 형상계수 k_1 과 k_2 에 의해 좌우된다. $k_1 \rightarrow \infty$ 이 되면 완전취성거동이 되고 작은 값일수록 하강기울기는 완만해지며, 결국 $k_1 \rightarrow 0$ 이 되면 완전소성거동이 된다. 따라서 k_1 값은 콘크리트의 압축강도와 비례하여 증가한다는 것이 Fafitis¹⁶⁾, Cusson등¹⁷⁾의 연구결과에서 나타난 일반적인 경향이다.

k_2 는 하강곡선의 기울기 뿐만 아니라 곡률을 좌우하는 값으로써, $k_2 \rightarrow 0$ 이 되면 하강곡선은 완전소성이 된다. 또한 k_2 값이 증가할수록 불복곡선이 되고 감소할수록 곡선은 대체로 오목한 형태가 된다.

응력-변형율 하강곡선에 대한 경계조건으로부터 k_1 은 식(7)로써 표현된다. 여기서 본 연구에서는 또 하나의 형상계수 k_2 를 구하기 위하여 고강도 및 초고강도 콘크리트의 응력-변형율 하강곡선의 하강기울기를 적절히 추정하는 것으로 판단되는 Ahmad등¹⁸⁾의 $2\epsilon_0$ 지점에 대한 압축강도($f_{2\epsilon_0}$) 추정식을 이용하였다. $f_{2\epsilon_0}$ 의 추정식은 다음 식(8)과 같다. 따라서, 응력-변형율 하강곡선에 대한 경계조건으로부터 k_1 은 다시 식(9)와 같이 표현될 수 있으며, 식(7)과 식(9)로부터 k_2 는 식(10)으로 표현된다.

$$f = 0.5 f'_c \rightarrow \epsilon = \epsilon_{0.5f'_c} \text{로부터,}$$

$$k_1 = \frac{0.693}{(\epsilon_{0.5f_c} - \epsilon_0)^{k_2}} \quad (7)$$

$$f_{2f_c} = f_c' (0.8841 + 0.007226 f_c') \quad (8)$$

$$f = f_{2f_c} \rightarrow \epsilon = \epsilon_0 \text{로부터,}$$

$$k_1 = \frac{\ln\left(\frac{f_{2f_c}}{f_c}\right)}{\epsilon_0^{k_2}} \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{\ln\left(\frac{\ln\left(\frac{f_{2f_c}}{f_c}\right)}{\ln 0.5}\right)}{\ln\left(\frac{\epsilon_0}{(\epsilon_{0.5f_c} - \epsilon_0)}\right)} = 1.27 - \frac{314000}{f_c'^2} \quad (10)$$

2.6 응력-변형률 관계 모델의 비교

콘크리트의 응력-변형률 거동은 그 측정방법이나 시험기의 강성, 공시체의 크기, 변형률 측정 게이지의 길이나 부착위치등 수많은 시험조건에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 검증된 일반적인 실험자료를 이용하여 모델식의 적합성을 평가하기 위하여 가장 일반적이며 유사한 시험조건하에서 측정된 野田¹¹⁾와 MacGregor¹²⁾의 실험자료를 비교 대상으로 선정하였다. 野田, MacGregor 등은 초고강도 콘크리트의 최대응력 이후의 응력-변형률 하강 거동을 포함한 완전한 응력-변형률 거동을 측정하기 위한 방법으로 일반적으로 사용되고 있는 고강성 변형률 제어 압축시험기와 동적변형률 측정장치를 이용하여 일정한 변위 유지하에서 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 원주공시체에 대한 단조증가 가력법에 의해 응력-변형률 거동을 실험적으로 구하였다.

Fig.5(a,b)에서는 野田의 실험결과를, Fig.6(a,b)는 MacGregor 등의 실험결과를 각각 본 연구에서 제안된 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계 곡선식과 동일한 모델로써 제시된 다른 연구자들¹³⁾의 실험적 또는 이론적 제안 모델과 비교하였다.

비교결과 곡선의 상승부에 있어서 Pafitis¹³⁾ 모델은 실험치와 비교하여 에너지흡수효과를 과대평가하는 것이 나타났다. 이것은 Pafitis 모델이 주로 압축강도 700kg/cm^2 이하를 근거로 제시되었으므로 또한 고강

도 콘크리트에 대해 과대평가하는 것이 입증된 ACI-318 탄성계수식을 상승곡선 형상계수에 적용한 까닭으로 보인다. 이에 반해 ACI-363 탄성계수식을 이용한 김등¹³⁾의 모델과 식(1)에 의한 제안모델은 응력-변형률 상승거동 실측치를 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다.

응력-변형률 곡선 하강부에 있어서는 하강곡선의 경사형상계수 k_1 과 k_2 를 압축강도가 증가함에 따라 오히려 감소하는 것으로 평가한 김등의 모델이 에너지흡수능력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 이에 반해 Pafitis 모델과 식(2)에 의한 제안 모델은 실험치와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

이와 같이 본 제안식은 초고강도 콘크리트에 대한 실험결과와 비교하여 응력-변형률 곡선의 전구간에 걸쳐 실험치와 일치하는 것으로 나타났다.

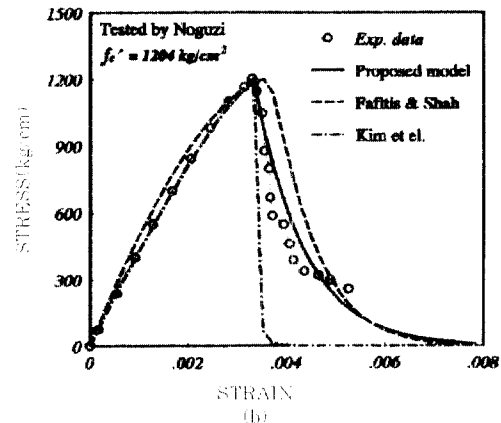
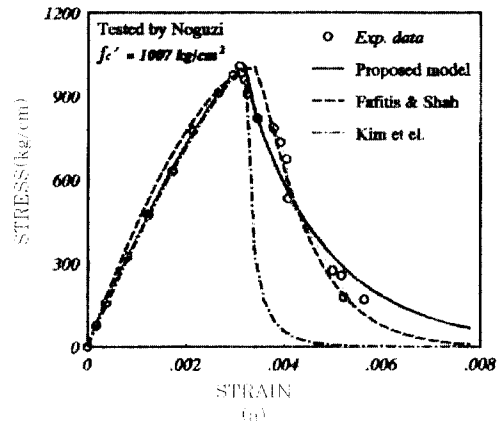


Fig.5 Comparison of experimental uniaxial stress-strain curves of Noguchi with proposed model

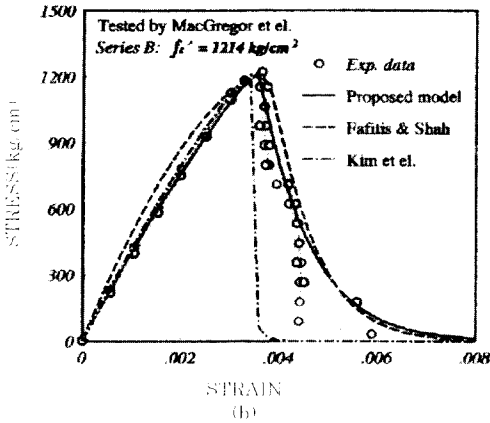
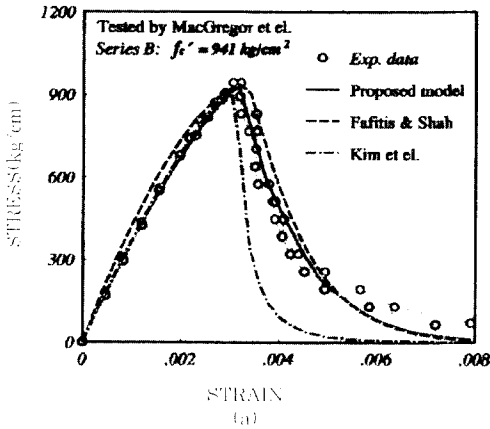


Fig. 6 Comparison of experimental uniaxial stress-strain curves of MacGregor et al. with proposed model

3. 초고강도 콘크리트 응력분포 모델의 제안

휨과 축력을 받는 콘크리트 부재의 단면에 발생하는 압축응력분포는 콘크리트 공시체 시험을 통하여 구한 응력-변형을 곡선과 유사한 분포형태를 나타내는데, 기존의 저강도 콘크리트 부재의 실제 및 해석시 이를 직사각형으로 단순화시킨 ACI-318 응력분포 모델을 이용하였다. 그러나 초고강도 콘크리트의 응력 변형률 거동은 저강도 콘크리트와는 차이 있으므로 실제부재에서의 응력분포형상 역시 달라질 수밖에 없다.

따라서 여기서는 제안한 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 바탕으로 새로운 응력분포 모델 변수를 정립하고 실제 응력분포에 가장 근사적인 이상화모형을 제시하고자 한다.

3.1 극한변형률(ϵ_u)

콘크리트 극한 압축변형률 ϵ_u 의 값은 콘크리트 단면의 강도를 예측하기 위한 중요한 변수중의 하나이다. 다음의 Fig.7은 최근 국내외에서 수행된 초고강도 콘크리트 압축 및 휨부재에 대한 실험결과로부터 수집한 압축강도에 대한 극한 압축변형률의 분포를 도시한 것이다.

최근 Kaar 등¹⁶⁾은 압축강도 50~1050kg/cm²의 콘크리트 부재의 파괴시 극한 압축변형률은 콘크리트의 강도가 증가할수록 감소하지만, 초고강도 콘크리트 부재에서도 ACI-318의 규정값 0.003이 적합한 것으로 보고하였다. 그러나 Fig.7에서, 평균값은 콘크리트 강도 전반에 걸쳐 0.003보다 크디 하더라도 전체적으로 적지 않은 값들이 0.003아래로 측정됨을 볼 수 있다. 이것은 Shin 등¹⁷⁾이 콘크리트 압축강도 280~1050kg/cm²의 콘크리트를 사용한 휨부재에 대한 실험결과에서 이미 보고된바 있으며, Swartz 등¹⁸⁾은 압축강도 423~845kg/cm²의 철근 콘크리트 보 실험을 통하여 0.0025를 설계값으로 제시하였다. CEB/FIP MC 90¹⁹⁾에서도 콘크리트 강도에 따라 감소하는 ϵ_u 의 값을 제시하였는데, 여기에서 대략 압축강도 700kg/cm²이상의 경우 0.0026이하의 값을 적용하고 있다. 이러한 규정은 핀란드 표준 Rak MK4-1989²⁰⁾와 노르웨이 표준 NS3473-1989²¹⁾에

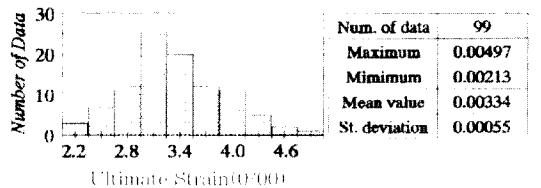
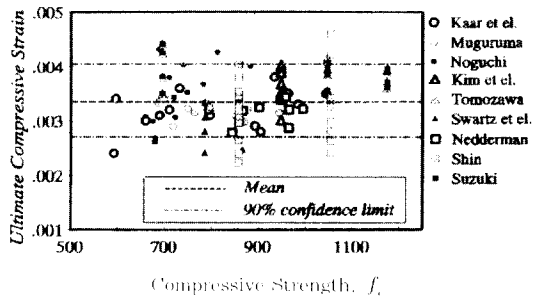


Fig.7 Ultimate compressive strain ϵ_u of ultra high strength concrete

서도 같은 경향을 보이는데, 원주공시체로 환산한 압축강도(각주공시체 압축강도의 약90%)가 대략 800kg/cm² 이상에서는 0.003이하의 값이 된다.

본 연구에서는 전술한 유럽각국의 연구결과들을 참고로하며, 초고강도 콘크리트의 매우 급격한 취성적 파괴거동의 특성을 고려하여 Fig.7의 실험데이터에 대해 90%신뢰도를 고려한 0.0027을 초고강도 콘크리트의 극한강도 예측을 위한 극한변형을 값으로 채택키로 한다. 그러나 ϵ_u 의 값이 감소하게 되면 부재의 처짐을 과소평가할 소지가 있으므로 좀 더 구체적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

3.2 공시체와 부재의 강도비(k_3)

콘크리트 부재의 압축강도는 크기효과, 타설방법, 장기재하 효과, 우발적인 편심 등의 요인으로 인하여 표준 공시체에 의해 결정된 콘크리트의 압축강도에 비해 다소 감소하게 된다. 이 값은 동일한 재료비함으로부터 타설된 콘크리트 부재와 표준 공시체의 최대 압축강도 비로써 표현된다.

기준의 보통강도 콘크리트에 대한 실험에서 이 값은 동일한 강도, 크기 및 형태를 가진 시험체에 대해 0.85~1.0의 범위내에 있는 것으로 나타났으며, 일반적으로 0.85를 사용하고 있다. 그러나 최근 Cusson²⁸⁾과 Saatcioglu²⁹⁾의 연구에서는 뒷개 부분과 같이 축하중에 의한 횡보강응력을 받지않는 초고강도 콘크리트에 대해 0.85를 사용할 경우 실험값보다 과대평가 됨을 보고하였으며, Collins³⁰⁾도 같은 결론을 내렸다.

Saatcioglu²⁹⁾은 압축강도가 1250kg/cm²인 기둥에 대한 실험에서 뒷개부분의 콘크리트가 공시체 압축강도의 70%에서 파괴됨을 보고하였으며, Muguruma³¹⁾도 뒷개 콘크리트 부분의 최대강도가 공시체 압축강도의 80%정도인 것으로 보고하였다. 이에 따라 최근에 Ibrahim³²⁾은 편심하중과 중심축하중을 받는 기둥부재에 대한 다수 연구자들의 실험자료 분석하여 다음 식(11)과 같이 초고강도 콘크리트의 경우 기준의 0.85보다 낮은 값을 사용하여야 함을 입증하였다.

$$k_3 = 0.85 - \frac{f_c'}{8160} \geq 0.725 \quad (11)$$

본 연구에서는 식(11)의 값을 응력분포 모델 변수

인 공시체와 부재의 강도비(k_3)로써 사용하였다.

3.3 초고강도 콘크리트의 응력분포 모델 제안

초고강도 콘크리트의 실제거동을 잘 표현하는 것으로 판단되는 식(1),(2)의 응력-변형을 관계곡선식을 이용하여 면적과 도심이 일치하고 실제의 응력-변형을 거동과 그 형태가 유사한 사다리꼴 응력분포 모델을 Fig.8과 같이 제안하였다.

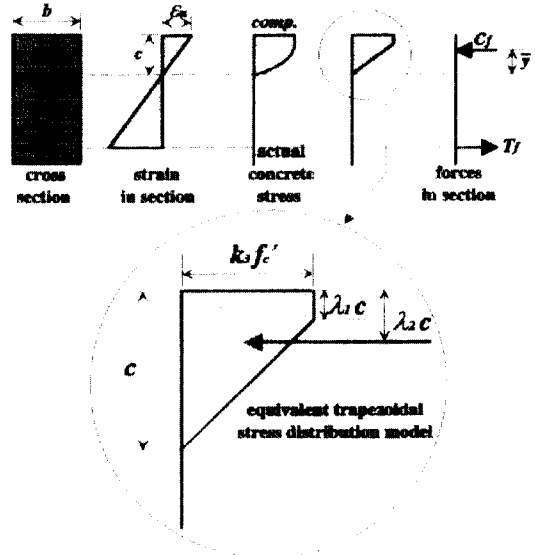


Fig.8 Proposed equivalent trapezoidal stress distribution model

등가사다리꼴 응력분포 모델 계수 λ_1, λ_2 는 가장된 응력분포 모델이 초고강도 콘크리트의 실제 압축 응력분포와 동일한 값의 압축력 및 그 위치를 가지도록 하기 위한 것으로, 평균응력계수 λ_1 과 도심계수 λ_2 는 각각 다음 식(12),(13)과 같다.

$$\lambda_1 = \frac{2 \int_0^c f_c \epsilon \, d\epsilon}{\epsilon_u k_3 f_c'} - 1 = 0.854 - 0.0005 f_c' \quad (12)$$

$$\lambda_2 = 1 - \frac{\int_0^c f_c \epsilon \, d\epsilon}{\epsilon_u \int_0^c f_c \, d\epsilon} = 0.444 - 0.000078 f_c' \quad (13)$$

Fig.9는 본 연구에서 제안한 식(1),(2)의 응력-변형률 모델로부터 구한 사다리꼴 응력분포 모델의 도심계수 λ_2 와 다수의 실험값을 비교한 것이다. 이 그림에서 식(13)의 값이 실험값들의 평균과 거의 일치

하는 반면, ACI-318의 설계기준값이 지나치게 작은 값을 알 수 있다. 따라서 ACI-318의 설계기준값을 초고강도 콘크리트에 적용할 경우 내력모멘트가 과대평가될 우려가 있다.

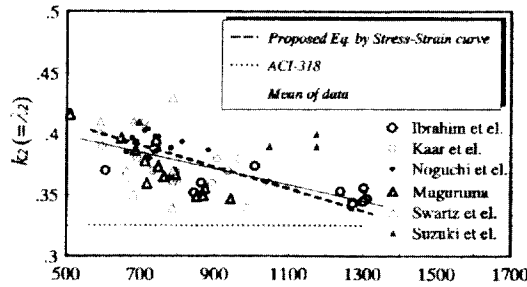


Fig.9 Equation for λ_2 compared to experimental data

3.4 응력분포 모델 비교 평가

기준에 수행된 휨과 축력을 받는 초고강도 콘크리트 기둥부재에 대한 실험적 연구결과를 기초로하여

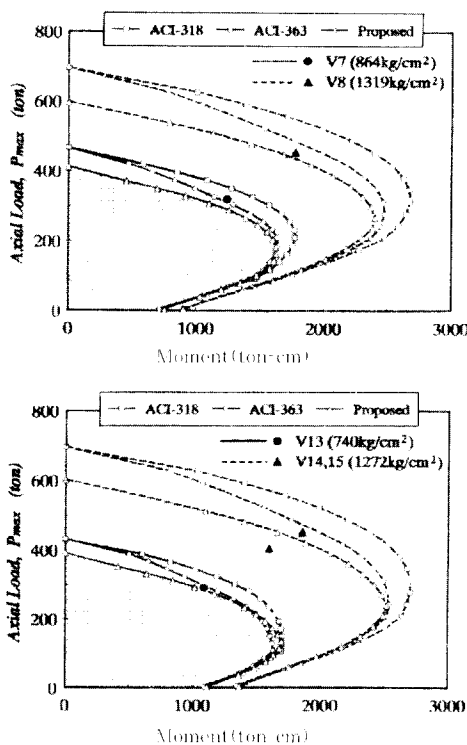
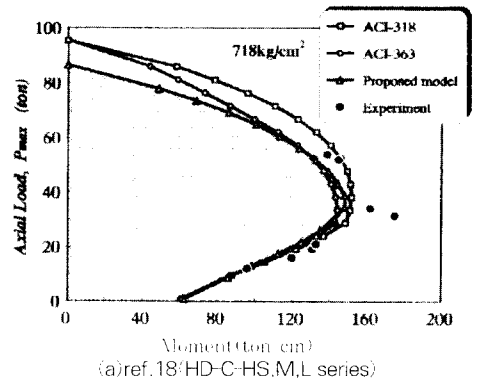


Fig.10 Comparison of P-M interaction on stress distribution models: experimental result by ref.24(Specimen V7,V8,V13,V14,V15)

직사각형 응력분포 모델을 이용한 ACI-318의 해석 방법과 ACI-363과 본 연구에서 제안된 사다리꼴 응력분포 모델로부터 구한 하중-모멘트 상관도를 이용하여 실험에 의한 극한강도를 비교함으로써 초고강도 콘크리트에 대한 적용성을 평가하였다.

여기서 압축지배영역과 인장지배영역에서의 철근의 응력은 철근의 변형률 ϵ_s 값에 철근의 탄성계수 E_s 를 곱한 값이 되며, 좀 더 정확한 축하중 및 휨강도 산정을 위하여 철근의 응력-변형률 곡선을 정확히 이상화시킨 Park¹¹⁾의 복합곡선모델에 따라 철근의 응력을 산출하였다.

Fig.10과 Fig.11(a,b)는 각 응력분포 모델을 이용한 하중-모멘트 상관도와 Ibrahim¹⁾, 현대건설 기술연구소²⁾와 Jensen³⁾이 수행한 편심하중을 받는 초고강도 콘크리트 기둥부재에 대한 실험결과와의 비교를 보여준다. 비교결과 인장지배 영역에서는 전반적으로 응력분포 모델에 따른 차이는 없다는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 압축지배 영역에서는



(a)ref.18:HD-C-HS,M,L series)

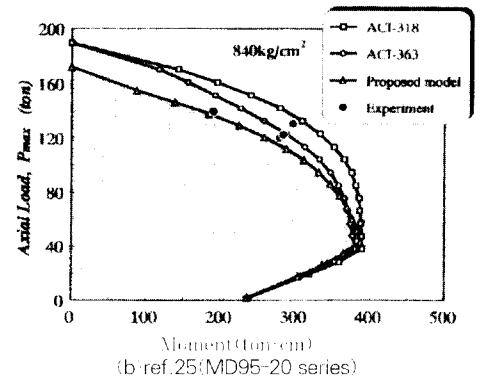


Fig.11 Comparison of P-M interaction on stress distribution models: experimental result by

ACI-318의 직사각형 응력분포 모델에 의한 산정값이 실측값에 비해 과대 평가되는 것을 볼 수 있으며, ACI-363의 사다리꼴 응력분포 모델에 의한 산정값도 안정적이라고 할 수 없음을 볼 수 있다. 이에 반해 본 연구에서 제안된 초고강도 콘크리트에 대한 사다리꼴 응력분포 모델에 의해 기둥의 강도를 산정할 경우 대부분 안전측으로 평가 될 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 초고강도 콘크리트를 이용한 휨과 압축을 받는 부재에서 압축지배의 경우에 ACI-318의 직사각형 응력분포를 적용하게 되면 비안전측으로 내력을 산정될 소지가 있으므로 ACI-363에서 제시한 사다리꼴 응력분포 모델 및 본 연구에서 제안한 새로운 사다리꼴 응력분포 모델을 사용하는 것이 보다 안전측이 될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 비선형 해석을 위한 응력-변형률 모델을 제안하고 이 모델을 이용하여 초고강도 콘크리트의 실제 응력-변형률 거동에 가장 적합한 응력분포 모델을 제시할 목적으로 초고강도 콘크리트에 대한 기존의 실험 자료를 수집하였으며, 이를 바탕으로 통계적 수치해석 기법을 이용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 식(1)과 식(2)와 같은 간결한 형태의 가변곡선 식으로써 이론적 응력-변형률 상승곡선식 및 하강곡선식을 통계기법을 사용하여 제안하였으며, 다양한 실험결과와 비교하여 응력-변형률 거동 전반에 걸쳐 정확히 예측하는 것으로 나타났다.

(2) 본 연구에서는 실제의 초고강도 콘크리트 응력-변형률 거동을 고려한 사다리꼴 응력분포 모델을 제시하였다. 실험결과와 비교하여 권심하중을 받거나 압축이 지배적인 기둥부재의 경우에 ACI 318의 직사각형 응력분포 모델을 적용하게 되면 비안전측으로 내력을 산정할 소지가 있으므로 본 연구에서 제안한 응력분포 모델(Fig.8)을 사용하는 것이 보다 안전측이 될 수 있을 것으로 판단된다.

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), ACI, Detroit, 1989.
2. ACI Committee 363, State-of-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-84), ACI, Detroit, 1984.
3. 장현수, 고강도 철근콘크리트 구조, 태림문화사, 1994년 10월.
4. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," ACI, Vol.79, No.6, Nov.-Dec, 1982, pp.484-490.
5. 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.
6. Fafitis, A., and Shah, S. P., "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Column," ACI 363 SP-87 High Strength Concrete Symposium, 1985, pp.213-232.
7. 野口貴文, 高強度コンクリートの基礎的力強性に関する研究, 東京大学, 博士論文, 1995, 3.
8. 김찬남, 이태균, 서용표, "형모강효과를 고려한 콘크리트의 응력-변형률 관계", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제2권1호, 1990년 5월, pp.116-121.
9. Cusson, D., and Paultre, P., "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.120, No.8T3, March, 1994, pp.783-804.
10. 장일영, 박훈규, 유영수, "국내 실강에 적합한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안," 한국콘크리트학회지, 제8권6호, 1969년 12월, pp.213-222.
11. 박훈규, 초고강도 콘크리트의 이론적 모델 강립에 관한 연구, 남양주공과대학교, 석사학위논문
12. 岡本 伸, 柳下文夫, "高強度コンクリートの應力-ひずみ特性," 콘크리트工学年次論文叢書集, Vol.14, No.3, 1976, pp.42-46.
13. Nie, 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.
14. Hognestad, E., Hanson, N. W., and Mchenry,

- D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", ACI, Vol.52, No.6, Dec. 1955, pp.455-479.
15. Kaar, P. H., Hanson, N. W., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete," Research and Development Bulletin No. RD051.01D, Portland Cement Association.
16. Shin, S. W., Kamara, M., and Ghosh, S. K., "Flexural Ductility, Strength Prediction, and Hysteretic Behavior of Ultra High-Strength Concrete Members", Second International Symposium on High-Strength Concrete, SP-121, ACI, Detroit, 1990, pp.239-263.
17. Swartz, S. E., Nikaen, A., Narayan Babu, H. D., Periyakaruppan, N., and Refai, T. M. E., "Concrete", High-Strength Concrete, SP-87, ACI, Detroit, 1985., pp.147-178.
18. 현대건설, 고강도 콘크리트의 실용화를 위한 재료/구조 실험 및 해석기법 연구, 연구보고서 91MTR01, 현대건설 기술연구소, 1995, 11.
19. Saatcioglu, M., and Razvi, S., "Behavior of confined High Strength Concrete Columns" Proceedings of CPCA/CSCF Structural Concrete Conference, May 1993, Toronto, Ontario, Canada, pp.37-50.
20. Collins, M. P., Mitchell, D., and MacGregor, J. G., "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete", Concrete international, May 1993, pp.2-9
21. Nishiyama, M., Fukushima, I., Muguruma, H., and Watanabe, F., "Axial Loaded Tests on High-Strength Concrete Prisms Confined by Ordinary and High-Strength Steel", Proceedings of Symposium, Utilization of High Strength Concrete, Norway, 1993, pp.322-329.
22. Ibrahim, H. H. H., and MacGregor, J. G., "Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Vol.94, No.1, Jan.-Feb. 1997, pp.40-48.
23. Park, P., and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons Inc., New York, 1975.
24. Ibrahim, H. H. H., and MacGregor, J. G., "Test of Eccentrically Loaded High Strength Concrete Columns", ACI Structural Journal, Vol.93, No.5, Sept. Oct. 1996, pp.585-594.
25. Bjerkeli, L., Tomaszewicz, A., and Jensen, S. S., "Deformation Properties and Ductility of High-Strength Concrete", Second International Symposium on High-Strength Concrete, SP-121, ACI, Detroit, 1990, pp.215-238.

요 약

본 연구에서는 기존의 초고강도 콘크리트에 대한 실험자료를 근거로 합리적인 통계적 기법을 이용하여 초고강도 콘크리트의 설계 실용화를 위한 응력 변형률 관계 모델과 응력분포 모델을 제안하는 것이 목적이다. 이를 위하여 첫째, 콘크리트의 응력 변형률 특성을 결정하는 재료 변수들(탄성계수, 최대 압축강도 시 변형률 등)에 대한 검토를 수행하였다. 둘째, 이를 바탕으로 일반성과 정확성을 동시에 갖춘 초고강도 콘크리트(700~1400kg/cm³)에 적합한 응력-변형률 모델을 제안, 비교 고찰하였다. 셋째, 제안된 응력-형률 모델로부터 초고강도 콘크리트 구조의 극한강도를 평가하기에 적합한 응력분포 모델을 제안, 일반성과 정확성을 비교 검증하였다.

(접수일자 : 1997. 8. 2)