

寸法効果、コンクリート強度並びに横拘束力を反映した コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式

Formulas of Stress-Strain curves of Confined Concrete
Considering Specimen Sizes, Concrete Strength and Lateral Confinement

小池狭千朗*, 畑中重光**

Sachio KOIKE and Shigemitsu HATANAKA

Abstract In the present study, the complete formulas of stress-strain curves of the confined concrete considering specimen sizes are proposed. These formulas consider the experimental factors including the section size of specimen, the pitch of hoops (proportional pitch), concrete strength and yield strength of hoops. The results from the formulas agree well with the test results.

1. はじめに

筆者らは、プレーン並びにコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果を、試験体寸法、コンクリート強度並びに帯筋ピッチを変えて実験的に調べた^{1~4)}。本報では、筆者らの一連の実験データを用いて、寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式を作成したので、その結果を報告する。

2. 解析対象データの性質

1) 解析対象データ

コンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の表示式に、試験体寸法とコンクリート強度の影響を併せて考慮した表示式はみられない。本章では、プレーンおよびコンファインドコンクリート角柱体についての筆者らの実験データを用いて、寸

法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式の作成を試みた。これらのデータは、以下の条件の下で実験したものである。すなわち、コンクリートは、同一コンクリートを使用し、帯筋のピッチと断面積は試験体寸法に比例する。試験体の形状は角柱体とし、高さとの比は2、試験体端面は鏡面仕上げとし、試験体端面と載荷盤との間には摩擦がある。養生方法は、すべて恒温恒湿空中養生(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$)とし、材令6週で圧縮試験を行ったものである。本解析に用いたデータの実験要因の概要は、表1に示す。

2) 解析項目と解析対象データの寸法効果の傾向

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式としては、筆者らの一人が提案した表1に示す式(1)および式(2)を採用し、式中の各係数を定式化する。定式化に当たって、式(1)で表す応力上昇域の曲線の形状を決めるパラメータの内、初期弾性係数 E_i には筆者らの実験データの解析から、寸法効果は無いものと仮定した。

本解析で採用した応力-ひずみ曲線の表示式は、

* 愛知工業大学工学部建築学科 (豊田市)

** 三重大学工学部建築学科 (津市)

表1中の式(1)および式(2)の中の係数、すなわちコンファインドコンクリートの圧縮強度(以下、 σ_f と略記)、最大応力時のひずみ(以下、 ε_f と略記)並びにピーク点で正規化した応力-ひずみ曲線の軟化域の形状を決めるパラメータ N_d (以下、 N_d と略記)を定めれば、応力-ひずみ曲線は定まる。筆者らは、試験体寸法、コンクリート強度並びに帯筋の横拘束効果の3つをパラメータに選び、寸法効果を考慮した応力-ひずみ曲線の表示式を作成した。

本報で取扱う表示式では、 $b=10\text{cm}$ のプレーン並びにコンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線に関する情報は、原則として実測によるものとする。参考値として、データが得られない場合に備えて、 $b=10\text{cm}$ のプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度 σ_o 並びに帯筋の断面積とピッチから定まる横拘束力の効果を反映するパラメータを用いて、

これらの値を補う表示式を表1の脚注に示す。

(1) 圧縮強度の寸法効果について

ここでは、 $b=10\text{cm}$ のコンファインドコンクリートの圧縮強度 $10\sigma_f$ (以下、 $10\sigma_f$ と略記)で基準化した圧縮強度比 R_σ ($R_\sigma = \sigma_f / 10\sigma_f$ 、以下、 R_σ と略記)と試験体寸法 b との関係について考察する。

図1に、筆者らの一連の実験で得られた R_σ と試験体寸法 b との関係の概要を示す。普通強度・空中養生のコンクリートの場合、図1に示すタイプIの曲線のように、 R_σ の値が1.0より大きくなる可能性がある。一方、高強度コンクリート・水中養生および高温気中養生されたものでは、図1のタイプIIの曲線のように、試験体寸法の増大とともに R_σ の値が低下する傾向を示す。

本解析では、湿度85%以上の気中で養生されたコンクリートのデータ、すなわちタイプIIのデータに

表1 応力-ひずみ曲線の表示式

応力-ひずみ曲線		$b=10\text{cm}$ のコンファインドコンクリートで無次元化したピーク点(R_σ, R_ε)と形状係数 N_d	
上昇域	$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{N_d \cdot (\varepsilon / \varepsilon_f)}{N_d - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_f) N_d} \dots (1)$	圧縮強度比 R_σ *2	$R_\sigma = \frac{\sigma_f}{10\sigma_f} = \frac{A}{10 + b} + B \dots (3)$ $A = 0.012 \cdot \sigma_o - 4.0$ $B = -0.0006 \cdot \sigma_o + 1.2$
*1	$N_d = E_i / (E_i - E_f)$ $E_i : \text{初期弾性係数}$ $E_f = \sigma_f / \varepsilon_f \text{ (ピーク点のセカントモジュラス)}$	相対最大応力時のひずみ R_ε *3	$R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{10\varepsilon_f} = \frac{C}{b} + D \dots (4)$ $C = -0.24 / S' + 3.2$ $D = 0.024 / S' + 0.68$ $S' : \text{帯筋ピッチ比 (} S' = S / b \text{)}$
下降域	$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{1}{N_d} + \frac{(N_d - 1) \cdot X}{(N_d - 1) + X N_d} \dots (2)$ $X = (\varepsilon / \varepsilon_f)^m$ $m = 1.2$ $N_d : \text{応力下降域の曲線の形状を決める係数}$	パラメータ比 R_{Nd} *4	$R_{Nd} = \frac{N_d}{10N_d} = \frac{E}{b} + F \dots (5)$ $E = -0.41 / S' - 1.9$ $F = 0.041 / S' + 1.19$

[注] *1: σ : 応力, ε : ひずみ, σ_f : 圧縮強度(kgf/cm²), ε_f : 最大応力時のひずみ, E_i : ここでは、 E_i に大きな寸法効果は無いと仮定し、実験データの平均値式 $E_i = 156 \cdot \sigma_o + 221000$ (kgf/cm²) を採用した。

σ_o : $b=10\text{cm}$ のプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度(kgf/cm²)

*2: $10\sigma_f$: 帯筋比が同じ $b=10\text{cm}$ のコンクリート角柱体の圧縮強度(kgf/cm²), b : 角柱体の断面の一辺(cm),
参考式 $10\sigma_f = 1.04 \cdot \sigma_o - 24 + (-0.0029 \cdot \sigma_o + 4.1) \cdot H_{\sigma_{LY}}$, $H_{\sigma_{LY}} = 2 \cdot A_w \cdot f_{sv} / [(b - 2 \cdot \phi_s - 2 \cdot d_c) \cdot S]$,
 R_σ : 帯筋比が同じ $10\sigma_f$ で無次元化した圧縮強度(kgf/cm²), S : 帯筋のピッチ(cm), A_w : 帯筋径(cm),
 f_{sv} : 帯筋の降伏点(kgf/cm²), ϕ_s : 帯筋径, d_c : コンクリートの表面から帯筋の外側までの距離(cm)

*3: $10\varepsilon_f$: 帯筋比が同じ $b=10\text{cm}$ のコンファインドコンクリート角柱体の最大応力時のひずみ,
参考式 $10\varepsilon_f = (2.0 / \sqrt{H_{\sigma_{LY}}} + 1.4) \cdot \sigma_o + (-2500 / \sqrt{H_{\sigma_{LY}}} + 2000)$,
 S' : 帯筋ピッチ比 $S' = S/b$ (本実験と異なる帯筋径および降伏点をもつ場合の近似式 $S' = 9.2 / H_{\sigma_{LY}}$)

*4: $10N_d$: 帯筋比が同じ $b=10\text{cm}$ のコンクリート角柱体の N_d 値, 参考式 $10N_d = -0.029 \cdot H_{\sigma_{LY}} + 0.0043 \cdot \sigma_o + 1.19$

対してモデル化した。なお、 R_o の値が試験体寸法によって上昇するという前報の乾燥気中養生時の実験結果(タイプI)のデータは、本解析では取り扱わない。

(2) 最大応力時のひずみの寸法効果

圧縮強度の場合と同様に、 $b=10\text{cm}$ の最大応力時のひずみ $10\varepsilon_f$ (以下、 $10\varepsilon_f$ と略記)で基準化した相対最大応力時のひずみ R_ε ($R_\varepsilon = \varepsilon_f / 10\varepsilon_f$ 、以下、 R_ε と略記)と試験体寸法 b との関係について考察する。

図2に、図1で用いた実験データのうち、 R_ε と試験体寸法 b との関係の概要を示す。本図によれば、 R_ε の値は、コンクリート強度、帯筋のピッチおよび養生条件にかかわらず試験体寸法の増大とともに低下する寸法効果を示す。

(3) 応力-ひずみ曲線の軟化域の形状を決めるパラメータ N_d の寸法効果

前項と同様に、 $b=10\text{cm}$ の N_d (以下、 $10N_d$ と略称で基準化した R_{N_d} ($R_{N_d} = N_d / 10N_d$)以下、 R_{N_d} と略記)と試験体寸法 b との関係について、筆者らの実験データを考察する。

図3に、 R_{N_d} と試験体寸法 b との関係の概要を示す。 R_{N_d} の値は、コンクリート強度、帯筋ピッチおよび養生条件にかかわらず、試験体寸法の増大とともに大きくなる寸法効果を示す。

3. 応力-ひずみ曲線の表示式

本解析に用いた筆者らの実験データは、以下の条件の下で得られたものである。すなわち、コンクリートには、同一コンクリートを使用し、帯筋のピッチと断面積は試験体寸法に比例させる。試験体の形状は角柱体、高さ H と幅 b の比は2、コンクリートの圧縮強度は $300 \sim 1000\text{kgf/cm}^2$ 、帯筋のピッチ S は

∞ (プレーンコンクリート) $\sim b/4$ (ここに、 b :供試体の断面の一辺の寸法)、供試体寸法 b は $9.7 \sim 30\text{cm}$ とした。養生はすべて恒温恒湿空中養生(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$)とした。

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式としては、筆者らの一人が提案した表1に示す式(1)および式(2)を採用し、式中の各係数を定式化する。式(1)で表す応力上昇域の曲線の形状を決めるパラメータの内、初期弾性係数 E_i には筆者らの実験データの解析に基づき、寸法効果は無いものと仮定した。

本解析で採用した応力-ひずみ曲線の表示式では、表1中の式(1)および式(2)の中の諸量 σ_f 、 ε_f 、および N_d を与えれば、応力-ひずみ曲線は定まる。ここでは、これらの諸量を求めるに際し、供試体寸法、コンクリート強度、並びに帯筋の横拘束効果の3つをパラメータに選んだ。なお、本報で取り扱う表示式では、 $b=10\text{cm}$ のプレーン並びにコンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線は原則として実測による。

1) 圧縮強度の表示式

ここでは、 $b=10\text{cm}$ のコンファインドコンクリートの圧縮強度 $10\sigma_f$ で基準化した圧縮強度比 R_o ($R_o = \sigma_f / 10\sigma_f$)と試験体寸法 b との関係を、表1に示す式(3)で与えることとし、試験体寸法 b 、帯筋ピッチ比 S' ($S' = S/b$)およびコンクリート強度 σ_o ($H/b=2$ 、 $b=10\text{cm}$ のプレーンコンクリートの圧縮強度)について回帰分析を行った。その結果、 R_o の値に及ぼす S' の影響が小さいことが確かめられたので、表示式(3)中の係数 A および B は σ_o のみの関数としてあらわされた。

なお、式(3)より求めた σ_f の計算値は、すべて実験値の $\pm 10\%$ 以内に納まった。

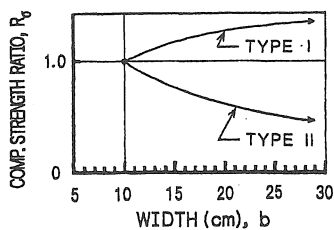


図1 R_o と試験体寸法の関係の概要

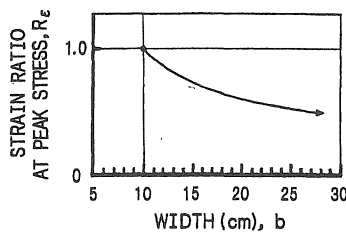


図2 R_ε と試験体寸法の関係の概要

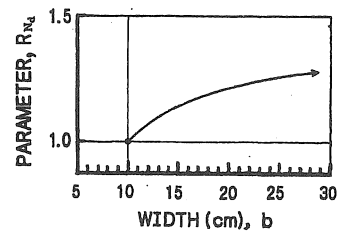


図3 R_{N_d} と試験体寸法の関係の概要

図4に、表示式(3)から求めた R_σ の計算値と試験体寸法 b との関係に及ぼすコンクリート強度 σ_o の影響を示す。本図によれば、 σ_o が332~978 kgf/cm²の本回帰式の適用範囲では、コンクリート強度が増大するほど寸法効果が大きくなり、 $\sigma_o = 978 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $b = 30 \text{ cm}$ の試験体の R_σ の計算値は0.81を示しており、圧縮強度の低下が著しい。

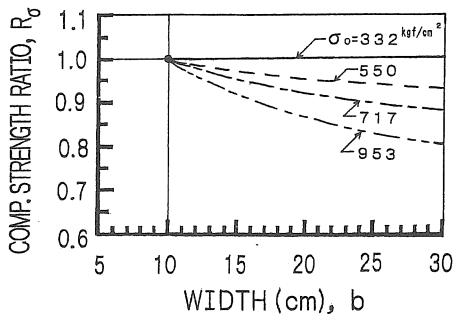


図4 圧縮強度比 R_σ と試験体寸法の関係 [回帰式(3)]

2) 最大応力時のひずみの表示式

圧縮強度の場合と同様に、 $b = 10 \text{ cm}$ の最大応力時のひずみ ϵ_f で基準化した相対最大応力時のひずみ R_ϵ ($R_\epsilon = \epsilon_f / \epsilon_f$)と試験体寸法 b との関係を、表1に示す式(4)で与えることとし、 b 、 S' 並びに σ_o の順に回帰分析を行った。

R_σ の場合とは逆に、 R_ϵ に及ぼす σ_o の影響は小さく、 R_ϵ の表示式(4)の係数CおよびDは S' のみの関数として表された。

なお、式(4)より求めた ϵ_f の計算値は、ほぼ実験値の±10%以内に、±10%を超えるものも±20%以内におさまった。

図5に、表示式(4)から求めた R_ϵ と試験体寸法 b の関係に及ぼす帯筋ピッチ比 S' の影響を示す。本図によれば、 S' が0.25から2.5(プレーンコンクリート)までの解析に使用したデータの範囲内では、 R_ϵ の計算値は試験体寸法が増大するほど減少する寸法効果を示し、さらに帯筋のピッチが増大するほど R_ϵ の計算値の低下率は大きく、寸法効果が増大する。 $b = 30 \text{ cm}$ のプレーンコンクリートでは、 $R_\epsilon = 0.79$ の計算値を示しており、大形寸法のコンクリートにおける寸法効果の顕著さをよく表示している。

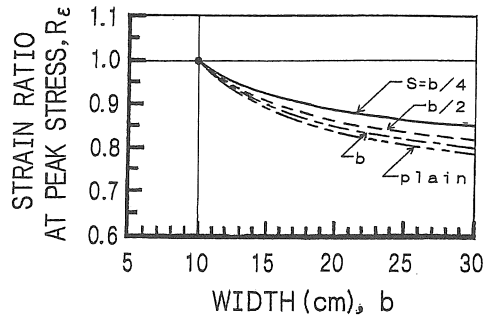


図5 相対最大応力時のひずみ R_ϵ と試験体寸法の関係 [回帰式(4)]

3) 軟化域の形状パラメータ N_d の表示式

ピーク点で正規化した応力-ひずみ曲線の軟化域の形状に対して、表1に示す式(2)中のパラメータ N_d の値を求め、これを $b = 10 \text{ cm}$ のコンファインドコンクリート角柱体の $1.0 N_d$ で無次元化した値 R_{Nd} を、 b 、 S' 並びに σ_o の順に回帰分析し、式(5)を得た。

R_ϵ の場合と同様に、 R_{Nd} に及ぼす σ_o の影響は小さく、 R_{Nd} の表示式(5)の係数EおよびFは S' のみの関数として表された。

式(5)より求めた N_d の計算値は、すべて実験値の±10%以内に納まった。

図6に、表示式(5)から求めた R_{Nd} と試験体寸法 b の関係に及ぼす帯筋ピッチ比 S' の影響を示す。図6によれば、 S' が0.25から2.5(プレーンコンクリート)までの本解析の適用範囲内では、 R_{Nd} の計算値は試験体寸法が増大するとともに増大する寸法効果を示し、その傾向は S' が小さくなるほど著しくなる。

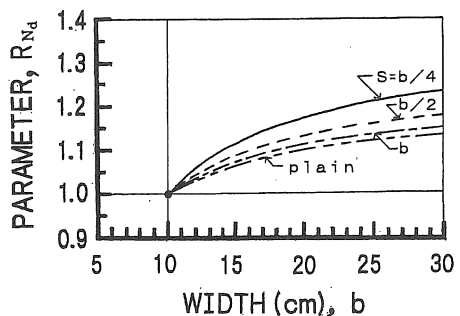


図6 応力軟化域のパラメータ N_d と試験体寸法の関係 [回帰式(5)]

4. 表示式による応力-ひずみ曲線の計算値と実験値の比較

図7(a)~(d)は、 $S = b/4$ のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法の影響を水セメント比別に示したもので、実線は実験値を、破線は計算値を示す。表示式から求めた応力-ひずみ曲線は、帯筋ピッチ並びにコンクリート強度のことなるコンクリートの応力-ひずみ曲線の寸法効果の実験結果の傾向をよく表示しており、提

案式の表示精度は高い。

図8(a)および(b)は、 $S = b/4$ のコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす水セメント比の影響を試験体寸法別に示したものである。入力データは、 $b = 10\text{cm}$ のコンファインドコンクリートの $100\sigma_f$ 、 $10\varepsilon_f$ および $10N_d$ である。これらの図によれば、いずれの寸法のもでも、水セメント比の違いによる塑性変形挙動の変化の傾向を提案式はよく追従しており、提案式の表示精度は比較的高いといえる。

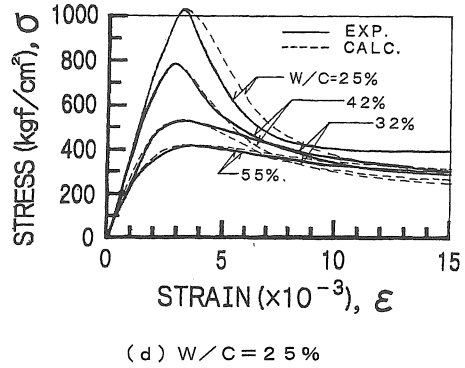
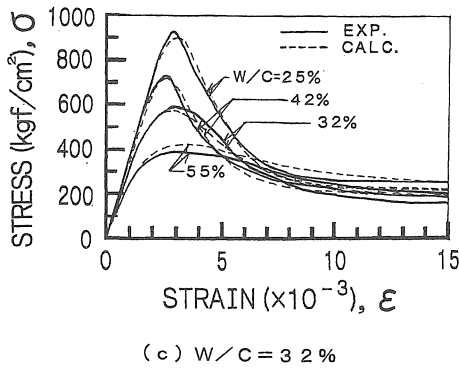
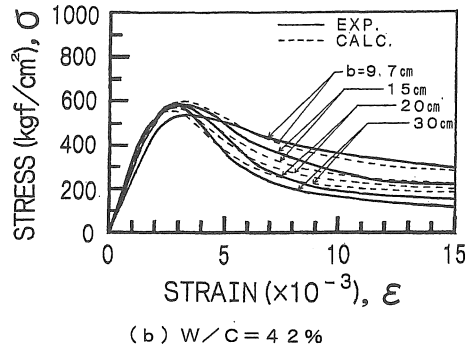
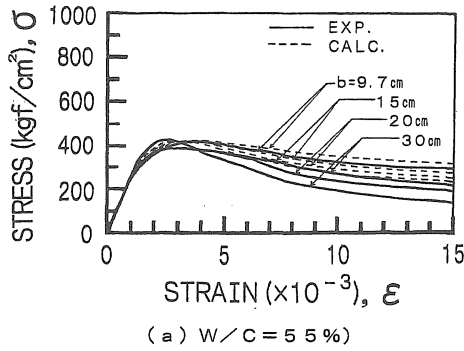


図7 応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響 ($\sigma_y = 3000\text{kgf/cm}^2$, $S = b/4$)

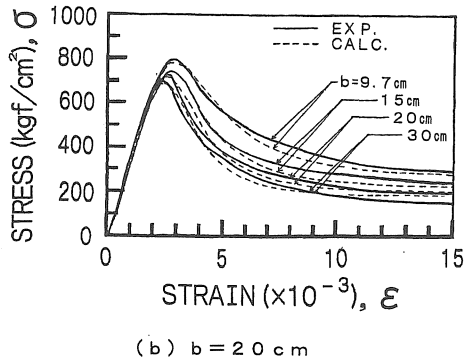
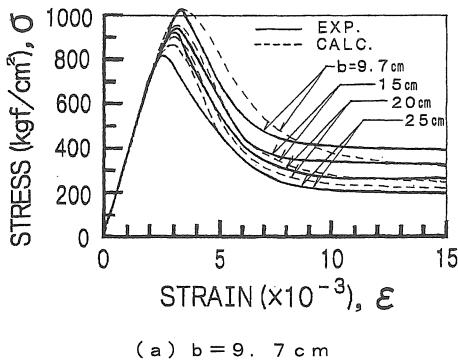


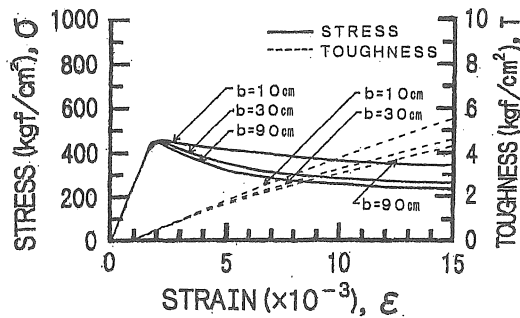
図8 応力-ひずみ曲線に及ぼす水セメント比の影響

5. 表示式の大型部材への適用

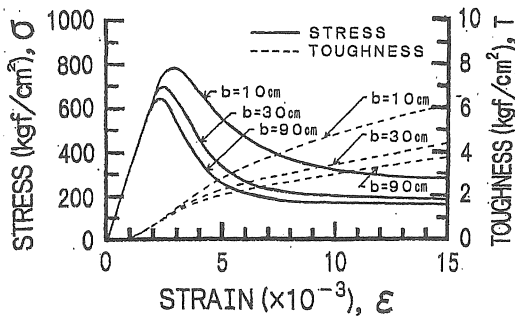
寸法効果を考慮したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式(1)および(2)は、 $b=9.7\sim 30\text{cm}$ の範囲の実験データに基づく回帰式であるため、試験体の寸法の適用範囲に制約がある。ここでは、図9(a)~(c)に示すように、表示式の適用範囲を越えて $b=90\text{cm}$ までの実大のコンファインドコンクリート部材の応力-ひずみ挙動を推定

した。図によれば、コンクリート強度が増大するほど圧縮強度の寸法効果は顕著で、 $b=90\text{cm}$ のものでは強度低下が著しい。一方、応力軟化域の曲線の形状はコンクリート強度が増大するほど、また部材寸法が増大するほど急勾配になっており、とくに $b=90\text{cm}$ のものでは、帯筋の拘束効果が減少し極めて脆性的な変形性状を呈する様子がうかがえる。

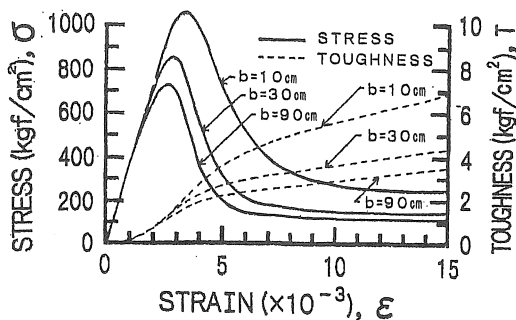
図9(a)~(c)に、表示式(1)および(2)から計算した $b=10, 30$ および 90cm 、帯筋ピッチ $S=b/4$ のコンファインドコンクリートのタフネス T (応力-ひずみ曲線下の面積)-ひずみ曲線を併記する。タフネスは図の右端の縦軸に示す。本図は、ひずみの増大に伴う部材のタフネスの変動を試験体寸法別に示したものである。これらの図によれば、ひずみが $\epsilon=15\times 10^{-3}$ の場合の $b=10$ のタフネスに対する $b=90\text{cm}$ のそれは、 $\sigma_o=350, 700$ および 1000kgf/cm^2 のコンクリートに対して、それぞれ60%、48%および41%を示し、コンクリートが高強度になるほどタフネスに及ぼす寸法効果が大きくなることを示している。とくに、 $b=90\text{cm}$ のもの $\epsilon=15\times 10^{-3}$ 時のタフネスは、コンクリート強度が増大しても増加せず、かえってやや減少する傾向を示し、エネルギー吸収能に欠ける性状を示すことを予測している。



(a) $\sigma_o = 350\text{kgf/cm}^2$



(b) $\sigma_o = 700\text{kgf/cm}^2$



(c) $\sigma_o = 1000\text{kgf/cm}^2$

図9 応力-ひずみ曲線の表示式の大型部材への適用 ($S=b/4, \sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$)

5. 結論

本研究では、コンファインドコンクリート角柱体の圧縮特性の寸法効果に及ぼすコンクリートの強度と帯筋ピッチの影響を調べるために、筆者らの実験から得られたデータを用いて、寸法効果を考慮した応力-ひずみ曲線の表示式を求めた。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

1) 試験体寸法、帯筋のピッチおよびコンクリートの強度レベルの異なるコンファインドコンクリートの圧縮強度、変形特性などの各特性値 R_o, R_ϵ および R_{Nd} に対する推定式(3)、(4)および(5)を誘導し、これらの諸要因を考慮した応力-ひずみ曲線を推定できる表示式(1)および(2)を提案した。

2) 圧縮強度比 R_o の値は、試験体寸法の増大とともに低下するが、寸法の増大とともに低下率は減少する。また、コンクリートの強度レベルが高くなるほどその低下率は大きくなる。

3) 相対最大応力時のひずみ R_ϵ の値は、試験体

寸法が増大するほど減少する寸法効果を示し、さらに帯筋のピッチが増大するほど R_{ϵ} の計算値の低下率は大きく、寸法効果が増大する。

4) 応力下降域の曲線の形状を示すパラメータ N_d を $b=10\text{cm}$ の試験体で無時限化した R_{Nd} の計算値は、試験体寸法が増大とともに増大する寸法効果を示し、その傾向は S' が小さくなるほど著しくなる。

〔謝辞〕本研究は、平成7、8および9年度 科学研究費・一般研究C（代表者：小池狭千朗）の一部として行った。本研究に協力して頂いた愛知工業大学卒研生の諸君に感謝します。また、セメントを提供頂いた日本セメント（株）並びに高性能AE減水剤を提供頂いた竹本油脂（株）に御礼申し上げます。

〔参考文献〕

1) 小池狭千朗・畑中重光：横拘束コンクリート

の圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.707-712、1990.6

2) 小池狭千朗・畑中重光：形状・寸法の異なるコンファインド高強度コンクリートの圧縮特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.397-402、1991.6

3) 小池狭千朗・畑中重光：コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.949-954、1992.6

4) 小池狭千朗・畑中重光・谷川泰雄：プレーンおよびコンファインドコンクリートの圧縮特性の寸法効果に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第471号、pp.119-130、1995.5

（受理 平成10年3月20日）