

論文 寸法効果を反映した横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線表示式

小池狭千朗* ・ 畑中重光**

要旨：筆者らは、先に角形横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法、帯筋のピッチ並びにコンクリート強度の影響について調べた。帯筋ピッチとコンクリート強度の影響を考慮した横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式は多数報告されているが、寸法効果を考慮した表示式の報告は少ない。本報では、既往の実験データを用いて、これらの要因に試験体寸法の影響を反映した横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線の表示式をなるべく簡便な形になるように作成するとともに提案した表示式によって、実験結果を比較的精度よく再現できることを確かめた。

キーワード：寸法効果, 表示式, 応力-ひずみ曲線, 横拘束コンクリート, 圧縮強度

1. はじめに

筆者らは、これまでの一連の実験により、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⁾。これまでに、コンファインドコンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線の表示式は多く提案されているものの、試験体寸法とコンクリート強度の影響も併せて考慮したものはほとんど見られない。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

1) 解析対象データの概要

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¹⁻³⁾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、試験体寸法にかかわらず同一のものを使用

した。試験体の形状は角柱体とし、高さ h と幅 b の比 H/b は2、試験体断面の一辺の長さ b は9.7~30cm、コンクリートの圧縮強度 σ_c は29.5~98 N/mm²、帯筋のピッチ S は ∞ (プレーンコンクリート) ~ $b/4$ 、帯筋のピッチと断面積は試験体寸法に比例させ、帯筋径は、ピッチ S が断面辺長 b と等しい角柱体で帯筋比が約0.3%となるように選んだ。試験体端面は鏡面仕上げとし、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。

2) 解析対象データの寸法効果の傾向

(1) 圧縮強度の寸法効果

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 σ_c で基準化した圧縮強度比 $R\sigma$ ($R\sigma = \sigma_c / 10\sigma_c$, 以下、 $R\sigma$ 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 $R\sigma$ と試験体寸法 b との関係を模式的に示す。気中養生された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、 $R\sigma$ の値が1.0より大きくなる可能性がある⁴⁾。一方、水中養

* 愛知工業大学助教授 工学部建築学科 工修 (正会員)

** 三重大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

生および高湿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、試験体寸法の増大たコンクリートのデータ、すなわちタイプIIのデータに対してモデル化を行った。なお、 $R\sigma$ の値が試験体寸法によって上昇するという乾燥気中養生時の実験結果(タイプI)は、ここでは取り扱わない。

(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、 $b=10\text{cm}$ の試験体の最大応力時のひずみ $10\varepsilon_f$ で基準化した最大応力時のひずみ比 $R\varepsilon$ ($R\varepsilon = \varepsilon_f / 10\varepsilon_f$, 以下、 $R\varepsilon$ と略記)と試験体寸法 b との関係について考察する。

図-2は、 $R\varepsilon$ と試験体寸法 b との関係を模式的に示したものである。 $R\varepsilon$ 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、一般に試験体寸法の増大とともに低下する。

(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(2)と同様に、 $b=10\text{cm}$ の試験体の N_d (以下、 $10N_d$ と略記)で基準化した RN_d ($RN_d = N_d / 10N_d$)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は、 RN_d と試験体寸法 b との関係を模式的に示したものである。 RN_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。

3. 応力-ひずみ曲線の表示式

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ

とともに $R\sigma$ の値が低下する傾向を示す⁴⁾。

本研究では、湿度85%以上の気中で養生された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、すなわちコンファインドコンクリートの圧縮強度 σ_f 、最大応力時のひずみ ε_f 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 を定めれば、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、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。

データが得られない場合に備えて、参考値として、 $b=10\text{cm}$ のプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度 σ_o 並びに帯筋断面積とピッチから定まる横拘束力 $H\sigma_{LY}$ を用いた表示式(参考式)を表-1の脚注に示す。

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 $R\sigma$ ($R\sigma = \sigma_f / 10\sigma_f$)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、

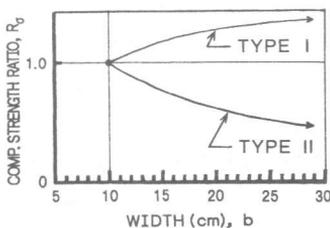


図-1 $R\sigma$ と試験体寸法の関係の概要

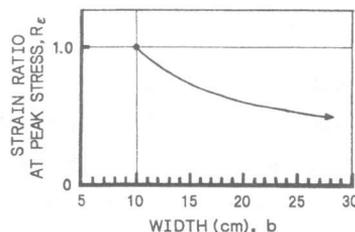


図-2 $R\varepsilon$ と試験体寸法の関係の概要

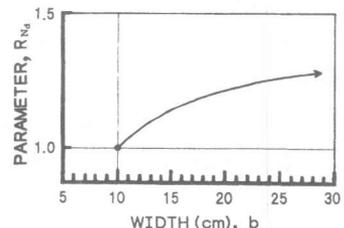


図-3 RN_d と試験体寸法の関係の概要

表-1 応力-ひずみ曲線の表示式

応力-ひずみ曲線		b=10cm のコンファイト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 *1	$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{N_a \cdot (\epsilon / \epsilon_f)}{N_a - 1 + (\epsilon / \epsilon_f)^{N_a}} \dots (1)$ $N_a = E_i / (E_i - E_f)$ E $_i$: 初期弾性係数 E $_f$ = σ_f / ϵ_f (ピーク点の切点モジュラス)	圧縮強度比 R σ *2	$R_\sigma = \frac{\sigma_f}{10\sigma_o} = \frac{A}{10 + b} + B \dots (3)$ $A = 0.012 \cdot \sigma_o - 4.0$ $B = -0.0006 \cdot \sigma_o + 1.2$
	下降域 *3	$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{1}{N_d} + \frac{(N_d - 1) \cdot X}{(N_d - 1) + X^{N_d}} \dots (2)$ $X = (\epsilon / \epsilon_f)^m$ m = 1.2 N $_d$: 応力下降域の曲線の形状を決める係数	最大応力時のひずみ比 R ϵ *3
		パラメータ比 R N_d *4	$R_{N_d} = \frac{N_d}{10N_d} = \frac{E}{b} + F \dots (5)$ $E = -0.41 / S' - 1.9$ $F = 0.041 / S' + 1.2$

[注] *1: σ : 応力, ϵ : ひずみ, σ_f : 圧縮強度(N/mm 2), 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ないと仮定し,実験データの平均値式 E $_i$ =150 $\cdot\sigma_o$ +22000(N/mm 2) を採用した。

σ_o :b=10cmのプレーンコンクリート角柱体の圧縮強度(N/mm 2)

*2: $10\sigma_f$:帯筋比が同じb=10cmのコンクリート角柱体の圧縮強度(N/mm 2), b:角柱体の断面の一辺(cm),

参考式 $10\sigma_f = \sigma_o - 24 + (-0.0029 \cdot \sigma_o + 4.1) \cdot H \sigma_{LY}$, $H \sigma_{LY} = 2 \cdot A_w \cdot f_{SY} / [(b - 2 \cdot \phi_a - 2 \cdot dc) \cdot S]$

R σ :帯筋比が同じ $10\sigma_f$ で無次元化した圧縮強度(N/mm 2), S:帯筋のピッチ(cm), A $_w$:帯筋断面積(cm 2),

f $_{SY}$:帯筋の降伏点(N/mm 2), ϕ_a :帯筋径(cm), dc:コンクリートの表面から帯筋の外側までの距離(cm)

*3: $10\epsilon_f$:帯筋比が同じb=10cmのコンファイトコンクリート角柱体の最大応力時のひずみ,

参考式 $10\epsilon_f = (2.0 / \sqrt{H \sigma_{LY}} + 1.4) \cdot \sigma_o + (-2500 / \sqrt{H \sigma_{LY}} + 2000)$,

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 σ_{LY})

*4: $10N_d$:帯筋比が同じb=10cmのコンクリート角柱体のN $_d$ 値, 参考式 $10N_d = -0.029 \cdot H \sigma_{LY} + 0.0043 \cdot \sigma_o + 1.2$

[計算例] 入力データ : b=20.0cm, S=5.0cm, S'=0.25, ϕ_a =0.8cm, σ_o =70.3N/mm 2 ,

$10\sigma_f$ =76.4N/mm 2 , $10\epsilon_f$ =2800 $\times 10^{-6}$, $10N_d$ =3.2

計算結果 : R σ =0.92, R ϵ =0.89, R N_d =1.18, σ_f =70.6N/mm 2 , ϵ_f =2490 $\times 10^{-6}$, N $_a$ =7.75, N $_d$ =3.77

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=10cmのプレーンコンクリートの圧縮強度)を説明変数として回帰分析を行った。その結果, R σ の値に及ぼすS'の影響が小さいことが確かめられ, 表示式(3)中の係数AおよびBは σ_o のみの関数として表された。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-4に, 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。図によれば, σ_o が32.5~95.8 N/mm 2 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

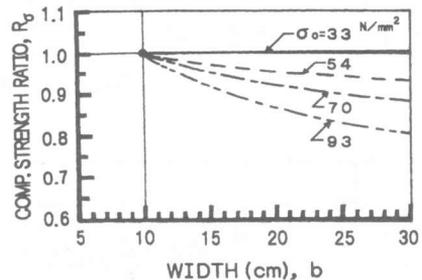


図-4 圧縮強度比R σ と試験体寸法の関係 [回帰式(3)]

くなる。例えば, σ_o = 95.8 N/mm 2 , b=30cmの試験体のR σ の計算値は0.81となり, 圧縮強度の低下が著しい。

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、 $b=10\text{cm}$ の試験体の最大応力時のひずみ $10\epsilon_f$ で基準化したひずみ比 R_ϵ ($R_\epsilon = \epsilon_f / 10\epsilon_f$)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_0 の順に回帰分析を行った。その結果、 R_σ の場合とは逆に、 R_ϵ に及ぼす σ_0 の影響は小さく、式(4)中の係数 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 $\pm 10\%$ 以内に、 $\pm 10\%$ を超えるものも $\pm 20\%$ 以内に収まった。

図-5に、式(4)から求めた R_ϵ と試験体寸法 b の係数に及ぼす帯筋ピッチ比 S' の影響を示す。図によれば、解析に使用した S' が0.25から2.0(プレーンコンクリート)までの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し、さらに帯筋のピッチが粗くなるほど R_ϵ の計算値の低下率は大きくなる。すなわち、寸法効果が顕著になる。例えば、 $b=30\text{cm}$ のプレーンコンクリートでは、 $R_\epsilon \approx 0.79$ と計算される。

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 $10N_d$ で無次元化した値 R_{N_d} を、 b 、 S' 並びに σ_0 の順に回帰分析し、式(5)を得た。

R_ϵ の場合と同様に、 R_{N_d} に及ぼす σ_0 の影

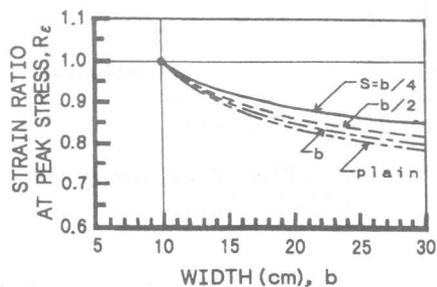


図-5 相対最大応力時のひずみ R_ϵ と試験体寸法の関係 [回帰式(4)]

響は小さく、式(5)中の係数 E および F は S' のみの関数として表された。なお、式(5)より N_d の計算値は、すべて実験値の $\pm 10\%$ 以内に収まった。

式(6)に、式(5)から R_{N_d} と試験体寸法 b の係数に及ぼす帯筋ピッチ S の影響を示す。図によれば、 S が $b/4$ から $2b$ (プレーンコンクリート)までの本回帰式の適用範囲内では、 R_{N_d} の計算値は試験体寸法の増大とともに大きくなり、その傾向は S が小さくなるほど顕著になる。

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コンクリートの強度レベル(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。全般的に見て、表示式から求めた応力-ひずみ曲線は、帯筋ピッチ並びに圧縮強度の異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いる。

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コンクリートの強度レベル(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 $10\sigma_f$ 、 $10\epsilon_f$ および $10N_d$ である。これらの図によれば、いずれの寸法の場合も、水セメント比の違いによる応力-ひずみ曲線の変化状況が比較的良好に表示されている。

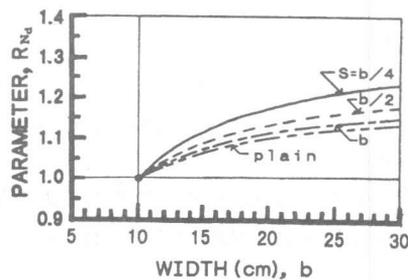
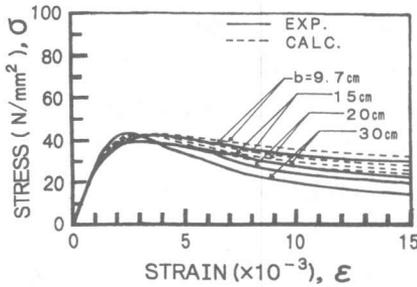


図-6 応力軟化域のパラメータ N_d と試験体寸法の関係 [回帰式(5)]

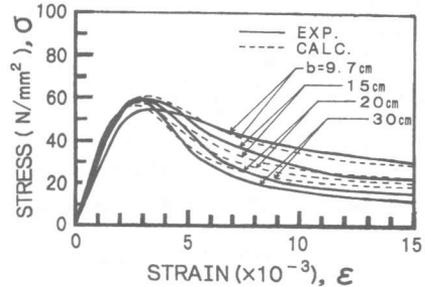
5. 大型部材への表示式の適用

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、

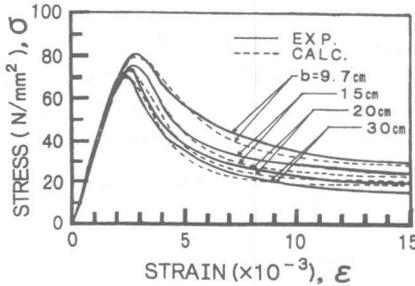
コンクリート強度が増大するほど圧縮強度の寸法効果は顕著で、 $b=90\text{cm}$ のものでは強度低下が著しい。一方、応力軟化域の曲線の形状はコンクリート強度が増大するほど、また部材寸法が増大するほど急勾配になっており、とくに $b=90\text{cm}$ のものでは、帯筋の拘束効果が減少し極めて脆性的な変形性状を呈する様子がうかがえる。



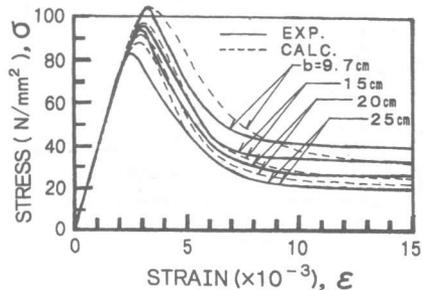
(a) 40 MPa級 ($\sigma_c = 41 \text{ N/mm}^2$)



(b) 60 MPa級 ($\sigma_c = 58 \text{ N/mm}^2$)

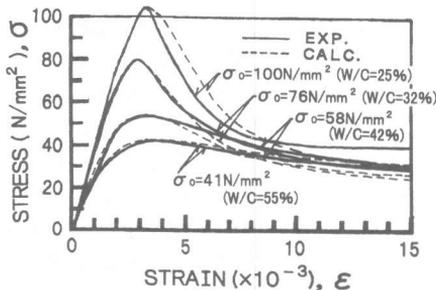


(c) 80 MPa級 ($\sigma_c = 76 \text{ N/mm}^2$)

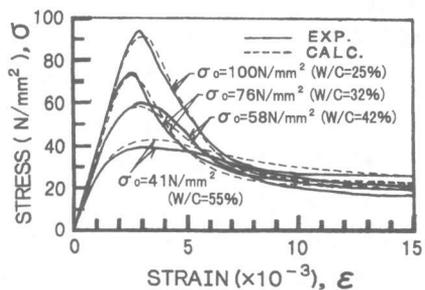


(d) 100 MPa級 ($\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$)

図-7 応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響 ($S = b/4$, $\sigma_y = 295 \text{ N/mm}^2$)

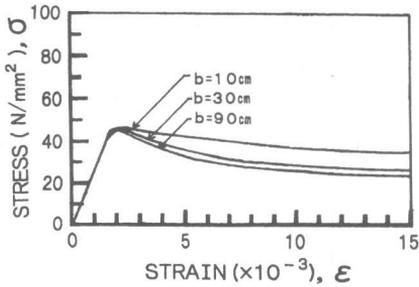


(a) $b = 9.7 \text{ cm}$

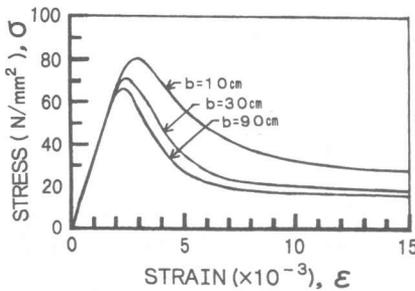


(b) $b = 20 \text{ cm}$

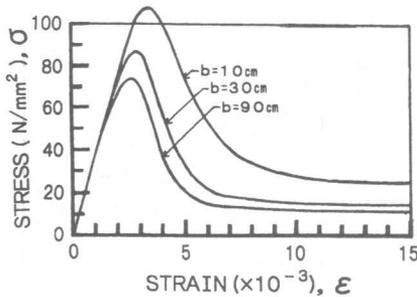
図-8 応力-ひずみ曲線に及ぼすコンクリートの強度レベルの影響 ($S = b/4$, $\sigma_y = 295 \text{ N/mm}^2$)



(a) $\sigma_0 = 34 \text{ N/mm}^2$



(b) $\sigma_0 = 69 \text{ N/mm}^2$



(c) $\sigma_0 = 98 \text{ N/mm}^2$

図-9 応力-ひずみ曲線の表示式の大型部材への適用 ($S = b/4, \sigma_y = 295 \text{ N/mm}^2$)

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関する筆者らの実験データを用いて、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応力-ひずみ曲線の表示式(表-1中の式(1)および(2))中のパラメータ $R\sigma$,

$R\epsilon$ および RNd に対し、それぞれ表-1中の式(3)、(4)および(5)を誘導した。

2) 圧縮強度比 $R\sigma$ 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(図-4)。

3) 最大応力時のひずみ比 $R\epsilon$ の値は、試験体寸法が増大するほど減少し、さらに帯筋のピッチが粗くなるほど $R\epsilon$ の低下率は大きく、寸法効果が増大する(図-5)。

4) 応力下降域の曲線の形状を表すパラメータ Nd を $b=10\text{cm}$ の試験体で無次元化した RNd の値は、試験体寸法の増大とともに増大し、その傾向は帯筋ピッチ S が小さくなるほど顕著になる(図-6)。

5) 本研究で提案した表示式の精度は比較的良好であった(図-7, 8)。提案式を用いて実大部材の応力-ひずみ曲線を推定した(図-9)。

[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。本研究に際し、助言を得た名古屋大学・谷川恭雄教授に深謝致します。また、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。

[参考文献]

- 1) 小池狭千朗・畑中重光: 横構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