

[50] 鋼繊維補強コンクリートの圧縮応力度—ひずみ度曲線の表示式

正会員 ○ 谷川 恭雄 (名古屋大学)

正会員 畑中 重光 (名古屋大学)

森 博嗣 (名古屋大学)

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRC と略記) の高じん性性能を活用し, これの耐震構造部材への適用を図ることを目途として, 筆者らは数年前より, 主として SFRC の圧縮載荷時の塑性変形挙動に関する一連の研究^{1)~4)}を行ってきたが, 本報では, これらの研究に引き続いて, SFRC の高圧縮ひずみ領域に至るまでの応力度—ひずみ度曲線 (以下, σ — ϵ 曲線と略記) の表示式について検討することにした。

2. 実験方法

2.1 実験の概要 表—1に示すように, 本実験では実験要因として, 水セメント比 ($W/C = 5.0, 6.0$ および 7.0 の3種類), 鋼繊維の体積混入率 ($V_f = 0, 0.75$ および 1.5 の3種類) 並びに試験体の形状・寸法を取り上げた。試験体の断面形状は, 図—1に示すように, 円柱形と角柱形の2種類とし, 円柱体は直径 (D) を 10 cm , 高さ と直径の比 (H/D) を $0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 3.0$ および 4.0 の8種類とした。一方, 角柱体は断面寸法 (D) を図—1に示す4種類とし, それぞれの断面寸法について, 高さ と断面寸法の比 (H/D) を $1.0, 1.25, 1.5, 2.0$ および 3.0 の5種類とした。また, 一部の円柱体については, 養生方法の影響についても調べた。試験体の個数は, 各要因の組合せごとに3~5個ずつ, 合計410個である。

2.2 試験体の製作および養生方法 試験体の製作には, 普通ポルトランドセメント, 木曾川産の川砂 (粒径 5 mm 未満), 天竜川産の川砂利 (粒径 $5\sim 10\text{ mm}$) およびせん断ファイバー (断面 $0.5 \times 0.5\text{ mm}$, 長さ 30 mm , 新日鉄製) を使用した。コンクリートの調合表は, 前報²⁾に示してあるため, ここでは省略する。円柱体および角柱体は, それぞれ縦打ちおよび横打ちとし, 角柱体は材令1日目に, また円柱体は材令2日目に脱型後, 一部の円柱体を除いては, 実験室内で空中養生を行った。試験材令は, すべて28日とした。

2.3 載荷および測定方法 試験体の載荷には, 高剛性圧縮試験機を使用し, ひずみ度は試験体の両端間に取り付けた2個の変位変換器によって測定した。ひずみ度の測定長は, すべての試験体について試験体高さ (H) から 1.2 cm だけ差し引いた値とした。また, ひずみ速度は毎分約 2.200×10^{-6} の一定とし, 原則として $40,000 \times 10^{-6}$ のひずみ度に達するまで載荷を継続した。

3. 実験結果とその考察

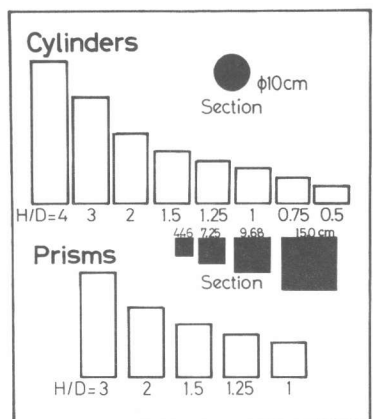
SFRC の σ — ϵ 曲線の測定例を図—2に示す。図から明らかなように, 角柱体と円柱体とでは, コンクリートの打込み方向が相違するため, 両者の σ — ϵ 曲線は著しく相違する。そのため, ここでは角柱体と円柱体を区別して, それぞれの σ — ϵ 曲線の表示式について検討する。

3.1 応力度—ひずみ度曲線の表示式 1軸圧縮載荷時の SFRC の応力下降域における σ — ϵ 曲線の表示式としては, 先に提案⁴⁾した次式を用いることとした。

表—1 実験の概要

Notation of specimen	W/C (%)	Vf (%)	Size of specimen	
			Section (cm)	H/D
1.5-50	50	1.5	4.46x4.46	0.5*
0-60	60	0	7.25x7.25	0.75*
0.75-60	60	0.75	9.68x9.68	1.0, 1.25
1.5-60	60	1.5	15.0x15.0	1.5, 2.0
1.5-70	70	1.5	$\phi 10$	3.0, 4.0*

[Notes] H/D: Slenderness ratio, W/C: Water-cement ratio by weight, Vf: Volume fraction of steel fiber, *: Only for cylindrical specimens.



図—1 試験体の形状・寸法

$$S = \frac{1}{n_d} + \frac{(n_d - 1)X}{n_d - 1 + X^{n_d}} \dots (1)$$

ここに、 $S = \sigma / F_{C2}$ 、 F_{C2} ：圧縮強度、 $X = E^n$ 、 $E = \epsilon / \epsilon_m$ 、 ϵ_m ：圧縮強度時のひずみ度（以下、最大ひずみ度という）、 n_d 、 m ：実験定数。また、応力上昇域における $\sigma - \epsilon$ 曲線の表示式としては、Popovics³⁾の提案による次式を使用した。

$$S = \frac{n_a \cdot E}{n_a - 1 + E^{n_a}} \dots (2)$$

ここに、 n_a ：実験定数。

上記の(1)式は、SFRCのみならず、プレーンコンクリート、帯筋の拘束を受けるコンクリートなどの高ひずみ領域に至るまでの $\sigma - \epsilon$ 曲線をかなりの精度で表示しうることを確かめている⁴⁾。

3.2 表示式中の各パラメータの定式化

(1) 圧縮強度 図-3は、試験体の細長比(H/D)が2の試験体の圧縮強度(F_{C2})とセメント水比(C/W)との関係を示したものである。この図から明らかなように、 F_{C2} の値はC/Wの増大とともにほぼ直線的に増大する傾向を示すが、鋼繊維混入率や試験体の形状・寸法による影響は、それほど顕著ではない。そのため、本実験によるH/D=2の試験体の圧縮強度(F_{C2})は、近似的に下式によって表示することにした。

$$F_{C2} = 200(C/W) - 100 \dots (3)$$

図中には、セメントの規格強度を 370 kg/cm^2 とした場合の旧JASS 5式による計算値も併記してあるが、今回の実験では、旧JASS 5式による計算値よりもやや低い値が得られた。

一方、図-4は、H/D=2の試験体による圧縮強度(F_{C2})に対する各H/Dの試験体の圧縮強度(F_C)の比と試験体の細長比(H/D)との関係を示した一例である。図中には、著者ら⁴⁾が普通コンクリートに対して提案した次式による計算値も併記してある。

$$H/D \leq 2 \text{ の場合: } F_C / F_{C2} = a_1 + b_1(D/H) + c_1(D/H)^2 \dots (4)$$

$$\text{ただし、 } a_1 = 1.37 \times 10^{-3} F_{C2} + 0.45$$

$$b_1 = -2.97 \times 10^{-3} F_{C2} + 1.07$$

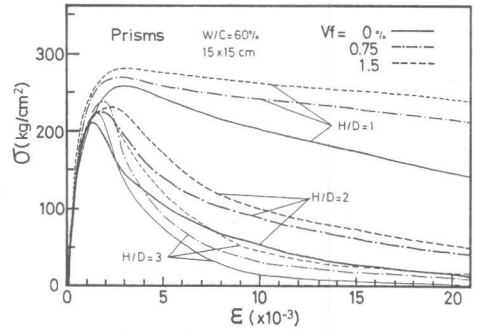
$$c_1 = 0.40 \times 10^{-3} F_{C2} + 0.04$$

この図によれば、実測値にかなりのバラツキがみられるが、H/D ≤ 2のSFRC試験体の圧縮強度比(F_C / F_{C2})は、プレーンコンクリートの場合と同様に、(4)式によってほぼ表示できる。しかし、H/Dが2よりも大きい試験体の F_C の値は、H/D=2の場合とほぼ同程度であるため、本報では次の(5)式を用いて表示することにした。

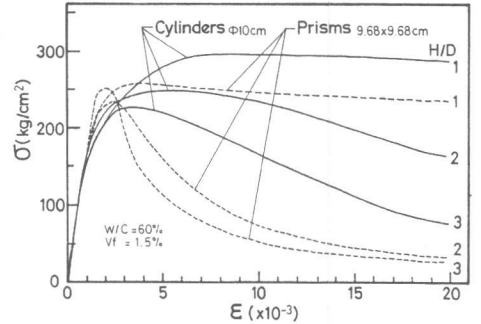
$$H/D \geq 2 \text{ の場合: } F_C / F_{C2} = 1 \dots (5)$$

(2) 最大ひずみ度

a) 角柱体の場合：図-5にH/D=2の角柱体の最大ひずみ度(ϵ_{m2})と鋼繊維混入率(V_f)との関係を示す。図によれば、 $V_f = 0$ のプレーン



(a) V_f および H/D の影響



(b) 打込方向の影響

図-2 SFRCの応力度(σ)-ひずみ度(ϵ)曲線

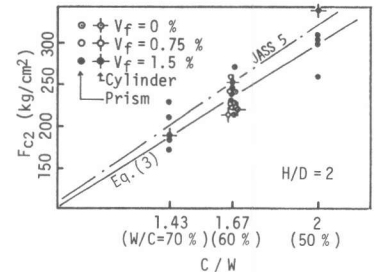


図-3 F_{C2} と C/W との関係

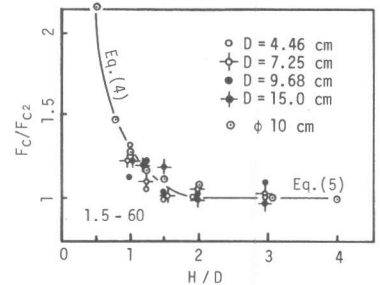


図-4 F_C / F_{C2} と H/D との関係

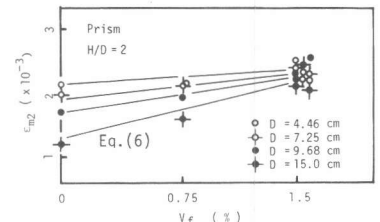


図-5 ϵ_{m2} と V_f との関係 (角柱試験体)

ンコンクリートの最大ひずみ度は、試験体の断面寸法が小さいほど大きい。また、最大ひずみ度 (ϵ_{m2}) は、鋼繊維混入率 (V_f) の増加に伴って増大するが、その増大率は一般に試験体の断面寸法 (D) が大きいほど大きくなる傾向を示し、本実験結果は次式によって表わされる。

$$\epsilon_{m2} = \{40 \cdot D \cdot V_f + (2500 - 80 \cdot D)\} \times 10^{-6} \dots\dots\dots (6)$$

次に、図 - 6 は、角柱体の最大ひずみ度比 ($\epsilon_m / \epsilon_{m2}$) と試験体の細長比 (H/D) との関係を示した一例であるが、この図から明らかなように、 $H/D \leq 2$ の範囲の $\epsilon_m / \epsilon_{m2}$ の値は、圧縮強度の場合と同様に、 H/D の 2 乗にほぼ反比例している。そこで、両者の関係を $H/D = 2$ のとき $\epsilon_m / \epsilon_{m2} = 1$ を通る 2 次式、すなわち次の (7) 式によって表わすことにした。

$$H/D \leq 2 \text{ の場合: } \epsilon_m / \epsilon_{m2} = a_2 (D/H)^2 + (1 - \frac{a_2}{4}) \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{ただし、 } a_2 = 1.5 - 0.4 V_f$$

一方、 H/D が 2 より大きい試験体の ϵ_m の値は、 H/D が変化してもほとんど変わらないため、次式で表わすことにする。

$$H/D \geq 2 \text{ の場合: } \epsilon_m / \epsilon_{m2} = 1 \dots\dots\dots (8)$$

b) 円柱体の場合： $H/D = 2$ のプレーンコンクリート円柱体の最大ひずみ度 (ϵ_{m20}) は、Popovics³⁾ の提案による次式によって近似的に表示できる。

$$\epsilon_{m20} = k \sqrt[4]{F_c} \times 10^{-4} \dots\dots\dots (9)$$

今回の実験結果の表示に (9) 式を適用したときの実験定数 k の値として、 $k = 6.0$ が得られた。

次に、 $H/D = 2$ のプレーンコンクリートの最大ひずみ度 (ϵ_{m20}) に対する $H/D = 2$ の SFRFC の最大ひずみ度 (ϵ_{m2}) の比について調べるために、 $\epsilon_{m2} / \epsilon_{m20}$ の値と V_f との関係を図 - 7 に示す。この図によれば、 $\epsilon_{m2} / \epsilon_{m20}$ の値は V_f の増加とともに増大し、その増大率は一般にセメント水比 (C/W) が小さいほど大きくなる傾向を示す。本報では、これらの関係を次式で表示することにした。

$$\epsilon_{m2} / \epsilon_{m20} = 1 + \{1.4 - 0.5 (C/W)\} V_f \dots\dots\dots (10)$$

一方、各試験体の最大ひずみ度と $H/D = 2$ の試験体のそれとの比 ($\epsilon_m / \epsilon_{m2}$) と試験体の細長比 (H/D) との関係を示した図 - 8 によれば、 $\epsilon_m / \epsilon_{m2}$ と H/D との関係は、角柱体の場合と同様であり、 H/D が 2 以上の範囲も含めて、先に示した (7) 式によって表示できる。ただし、(7) 式中の a_2 の値は、次のように表わされる。

$$a_2 = 1.3 + 0.45 V_f \dots\dots\dots (11)$$

(3) 実験定数 m 次に、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状を決めるパラメータ m 、 n_a および n_d の定量化を行う。パラメータ n_d は、ひずみ度が無限大のときの σ / F_c の取束値に關係する値であり、パラメータ m は、その取束の速さに関する値である。 m と n_d の値を種々に変化させた場合の計算結果とすべての実測結果とを対比して検討した結果、実測曲線の形状は、角柱体の場合は $m = 0.3$ 、円柱体の場合は $m = 0.2$ と仮定したときの計算

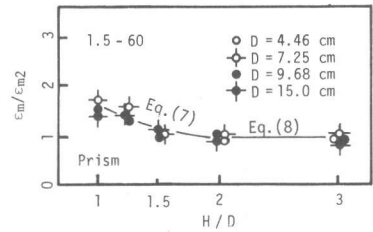


図 - 6 $\epsilon_m / \epsilon_{m2}$ と H/D との関係 (角柱試験体)

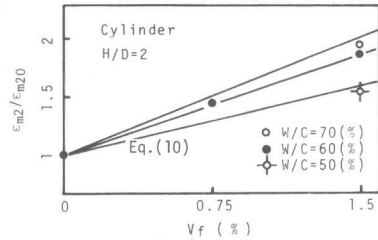


図 - 7 $\epsilon_{m2} / \epsilon_{m20}$ と V_f との関係 (円柱試験体)

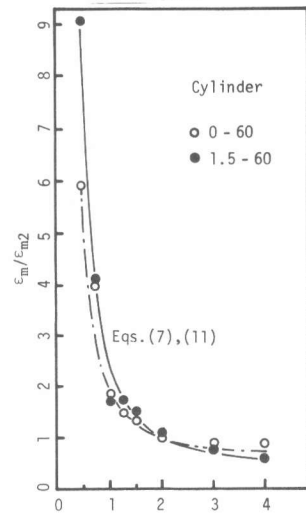
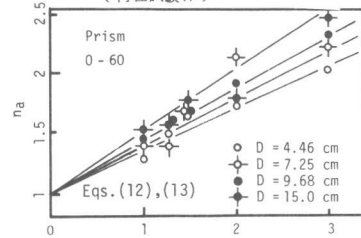
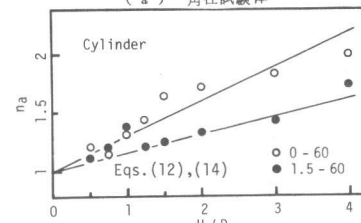


図 - 8 $\epsilon_m / \epsilon_{m2}$ と H/D との関係 (円柱試験体)



(a) 角柱試験体



(b) 円柱試験体

図 - 9 n_a と H/D との関係

曲線とよく一致することが確かめられた。

(4) 実験定数 n_a

a) 角柱体の場合：角柱体の応力上昇域における $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状を、Popovics による (2) 式で表示した場合の実験定数 n_a と H/D との関係の一例を図 - 9 (a) に示す。一般に、 n_a の値は H/D の増大に伴って比例的に増大し、その増大率は試験体の断面寸法 (D) が大きいほど、また水セメント比 (W/C) および鋼繊維混入率 (V_f) が小さいほど大きくなる。 H/D が小さくなると、 n_a の値が無限に 1 に近づくことを考慮して、これらの関係を次のような 1 次式で表示することにする。

$$n_a = 1 + a_3 (H/D) \dots\dots\dots (12)$$

式中の a_3 の値は、簡略化のため次式で表わすものとする。

$$a_3 = 0.015D - 0.08V_f + 0.3 \dots\dots\dots (13)$$

b) 円柱体の場合：円柱体によって得られた (2) 式中の係数 n_a と H/D との関係を図 - 9 (b) に示す。この図を用いて、角柱体の場合と同様に (12) 式中の実験定数 a_3 の値を表わすと次式が得られる。

$$a_3 = 0.3 - 0.1V_f \dots\dots\dots (14)$$

(5) 実験定数 n_d

a) 角柱体の場合：(1) 式中の m の値を 0.3 と仮定したときの実験定数 n_d と H/D との関係を図 - 10 (a) に示す。 H/D と V_f の関数として n_d の値を表示すれば、下式のようなになる。

$$n_d = 1 + (3 - 0.3V_f) \cdot (H/D)^{1.5} \dots\dots\dots (15)$$

b) 円柱体の場合：円柱体に対する n_d の値と H/D との関係を示した図 - 10 (b) によれば、 n_d 値は、鋼繊維混入率 (V_f)、セメント水比 (C/W) などをパラメータとして次式で表わされる。

$$n_d = 1 + \{ [7.0(C/W) - 4] - [3.5(C/W) - 3]V_f \} (H/D) \dots\dots (16)$$

3.3 モデル曲線と実測曲線との比較

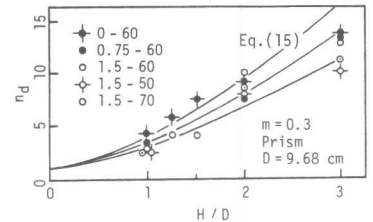
上記の各表示式を用いて求めた角柱体および円柱体のモデル曲線と実測曲線との比較の一例を図 - 11 (a) ~ (c) に示す。

4. むすび

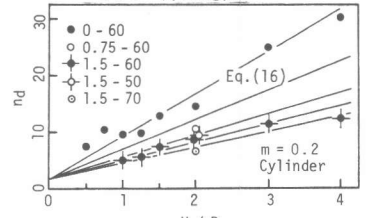
以上のように、本報では、本報では鋼繊維補強コンクリートの高圧縮ひずみ領域に至るまでの応力度 - ひずみ度曲線の表示式を提案し、表示式中の各パラメータの定式化を試みた。なお、本研究費の一部は、昭和 54 年度科研費・試験研究 (1) によったことを付記し、研究代表者である小林一輔東大教授に深く感謝の意を表します。

〔文献〕

- 1) 谷川, 橋詰, 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム報文集, 昭 52.11, p.25.
- 2) 小阪, 谷川, 畑中, セメント技術年報, 第 32 巻, 昭 53, p.505.
- 3) Y. Tanigawa, K. Yamada and S. Hatanaka, Trans. of JCI, 1979, p. 239.
- 4) 谷川, 畑中, 日本建築学会大会梗概集, 昭 54.10, p.107.
- 5) S. Popovics, Cem. Con. Res., Vol.3, No.5, Sept. 1973, p. 583.
- 6) 小阪, 谷川, セメント・コンクリート, No.265, 昭 44.3, p.2.

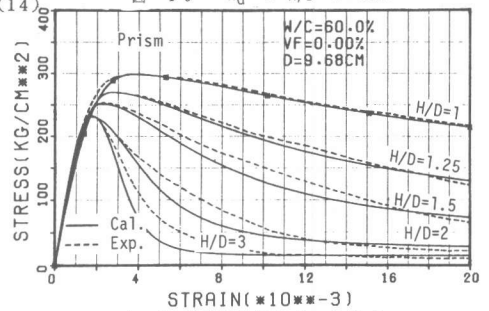


(a) 角柱試験体

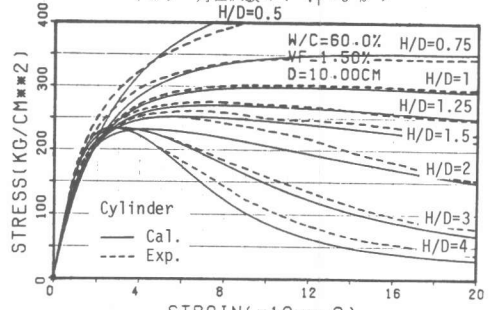


(b) 円柱試験体

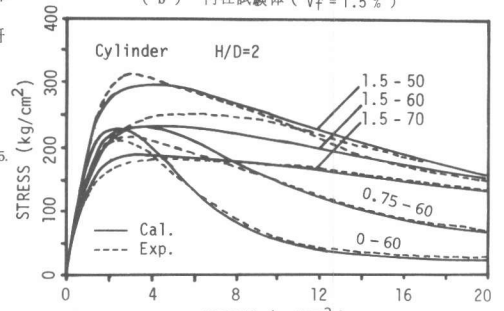
図-10 n_d と H/D との関係



(a) 角柱試験体 ($V_f=0\%$)



(b) 円柱試験体 ($V_f=1.5\%$)



(c) 円柱試験体 ($H/D=2$)

図-11 $\sigma - \epsilon$ 曲線の計算結果と実測結果との比較