

# [78] 流動化剤を使用した鋼繊維補強高強度コンクリートに関する研究

正会員 谷川 恭雄 (三重大学工学部)

正会員 ○ 森 博嗣 (三重大学工学部)

## 1. まえがき

近年コンクリートの高強度化に対する関心が高まりつつあるが、高強度化に伴うコンクリートの脆性的な破壊性状を改善することは、実用化のための一つの重要な課題である。本研究では、その方法として鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと略記)を用い、高強度でかつ高靱性のコンクリートを得るための一連の実験を行った。一般に、低水セメント比(W/C=25~35%)で高スランプ(Sl=20cm前後)のSFRCを通常の混練方法で製作することは困難であるが、流動化剤を使用することによって、この問題は比較的容易に解決できる<sup>1)2)3)</sup>。しかし、流動化剤の多量添加による性状の変化も含め、この種のコンクリートに関する基礎的なデータは少なく不明な点が多い。そのため、本研究では流動化剤を使用した高強度SFRCのまだ固まらない状態および硬化した状態における諸性状を調べることにした。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験要因およびコンクリートの製作方法

実験要因として、水セメント比(W/C:25,30および35%)の3種類)並びに鋼繊維の体積混入率( $V_f$ :0,0.75および1.5%)の3種類)を取り上げた。コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、川砂(寸法:5mm未満、粗粒率:2.80)、川砂利(最大寸法:15mm、粗粒率:6.73)および鋼繊維(カットワイヤ、 $\phi 0.5 \times 30$ mm)を用いた。また、流動化剤(ナフタリンスルホン酸塩系)の添加量(SP)は、セメント重量(C)に対して2%の一定とした。調合表を表-1に示す。コンクリートの混練は、強制練りミキサーを用いて図-1に示す手順で行った。

### 2.2 測定項目および測定方法

(1) まだ固まらないコンクリートについて:スランプ、空気量、ブリーディング量などを測定した。スランプは、混練の直後から2時間後まで測定し、スランプダウンの性状を調べた。また、スランプコーン引上げ直後のコンクリート上面の沈下挙動(ここでは、これをスランピングと呼ぶ)を調べるために、図-2中に示したスランピング速度自動測定装置を考案した。

(2) コンクリートの凝結について:コンクリートの凝結状態を調べるために、超音波センサー(周波数50kHz)を側面に取り付けたアクリル製型枠を試作し、打設後48時間までのコンクリートの超音波伝搬時間を連続測定した(図-4参照)。

(3) 硬化コンクリートについて:圧縮強度( $F_c$ )、割裂引張強

表-1 コンクリートの調合および実測スランプ

Series	W/C (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	Fiber (kg)	AE (W/C%)	WR (W/C%)	SP (W/C%)	Slump (cm)
1.5-25	25	200	800	817	501					20.8
1.5-35	35	195	557	980	551	117				18.3
1.5-30	30	200	667	900	528		0.4	0.2	2.0	23.2
0.75-30	30	175	583	762	825	59				19.5
0-30	30	150	500	576	1170					20.6

[Notes] AE:AR agent, WR:Water-reducing agent, SP:Super-plasticizer

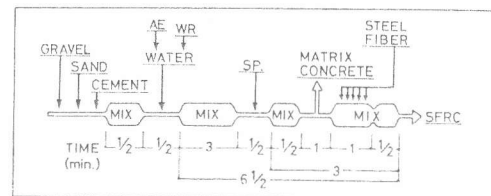


図-1 コンクリートの混練方法

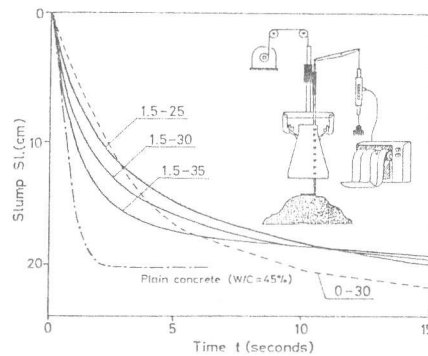


図-2 コンクリート上面の沈下挙動(スランピング)の測定例

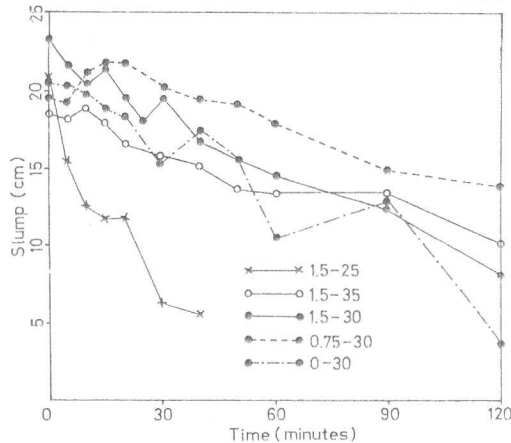


図-3 スランプの経時変化

度( $F_t$ )、圧縮応力( $\sigma$ )—ひずみ( $\epsilon$ )曲線および乾燥収縮ひずみ( $\epsilon_s$ )を測定した。試験体は、いずれも  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  円柱体として、各シリーズ毎に圧縮試験用12個、割裂引張試験用3個、乾燥収縮測定用3個を製作した。試験体は、すべて水中養生を行い、材令28日目に実験に供した。圧縮荷重実験には高剛性圧縮試験機を用い、軸ひずみ度が約1%に至るまでの $\sigma$ — $\epsilon$ 曲線を測定した。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性質

混練直後に測定したスランプの値を前掲の表-1に示す。スランプ値は、いずれのコンクリートも20cm前後となり、一応良好なコンシステンシーを示したが、単位セメント量が大きく、また、流動化剤を多量添加したため、スランプコーンを引き上げた後もゆっくりとフローした。図-2は、スランピング速度を表わす  $S1_t$ — $t$  曲線を示している。比較のため、流動化剤を使用しないブレンコンクリート ( $W/C=45\%$ ) の  $S1_t$ — $t$  曲線も併示したが、鋼繊維を混入したコンクリート (1.5-25、1.5-30、および1.5-35シリーズ) は、単位水量が大きいため、初期スランピング速度は、鋼繊維を混入していない0-30シリーズと比べて若干速くなるが、スランプが一定値におちつくまでに要する時間は、ほぼ同程度 (30秒~50秒) であった。次に、図-3は、時間経過に伴うスランプダウンを示したものである。図によれば、 $W/C=25\%$  のシリーズを除けば、混練後90分経過しても12~15cmのスランプ値を示している。これらの測定値は、測定時の3分前から練返しを行って求めたものであるが、十分な練返しを行わない場合には、スランプダウンは非常に大きくなる。なお、空気量およびブリージング量は、各シリーズによって顕著な相違はみられなかった。

#### 3.2 コンクリートの凝結性状

コンクリートの凝結性状を調べる方法としては、貫入試験等が一般的であるが、本研究では、コンクリート内部における凝結・硬化性状を連続的に測定・記録するため、超音波伝搬速度を測定した<sup>4)</sup>。図-4は、今回の実験で得られた流動化SFRCの超音波伝搬速度—時間曲線を示したものである。なお、補足実験として、 $W/C=50\%$  のブレンコンクリートに、流動化剤 (SP) をセメント重量 (C) の3%まで順次増加させた場合、および流動化剤添加率 (SP/C) を2%の一定として単位水量 (W) を  $146 \sim 197 \text{ kg/m}^3$  の範囲で変化させた場合についても測定したが、それらの結果を図-5および図-6に示す。図-5によれば、単位水量が同じ場合、流動化剤の添加によるコンクリートの凝結遅延効果はかなり顕著であるが、流動化剤を1%以上のように多量に添加する割合では、一般に単位水量を大きく減少させることができるため、図-6に示されるような単位水量の減少に伴う凝結促進効果と相まって、著しい凝結遅延は一般的には観察されない。しかし、SFRCの場合、鋼繊維混入によるスランプロスを解消するため、マトリクスコンクリートは非常に過流動

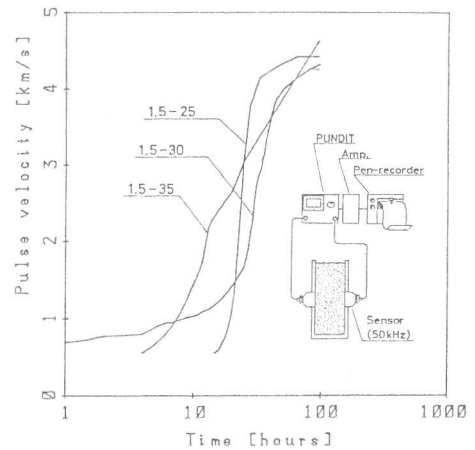


図-4 SFRCの超音波伝搬速度—時間曲線

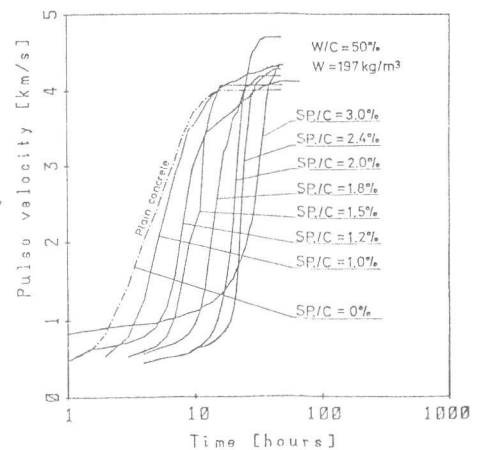


図-5 超音波伝搬速度—時間曲線に及ぼす流動化剤添加率 (SP/C) の影響

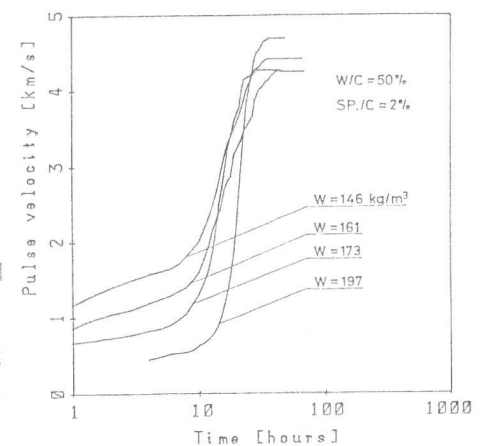


図-6 超音波伝搬速度—時間曲線に及ぼす単位水量 (W) の影響

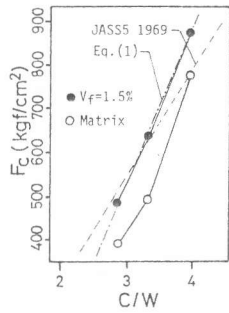


図-7 圧縮強度 ( $F_c$ ) とセメント水比 ( $C/W$ ) の関係

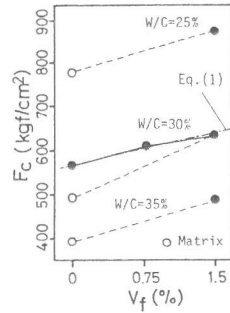


図-8 圧縮強度 ( $F_c$ ) と鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) の関係

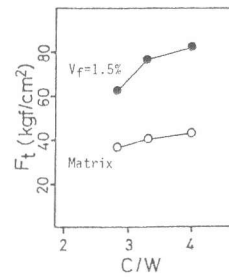


図-9 引張強度 ( $F_t$ ) とセメント水比 ( $C/W$ ) の関係

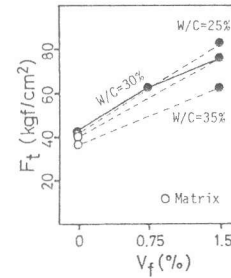


図-10 引張強度 ( $F_t$ ) と鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) の関係

の状態にあり、普通コンクリートに比べて単位水量も大きくなる結果、流動化剤の多量添加による凝結遅延効果が表面化する可能性が高く、今後、流動化SFRCの調合に関してさらに詳細な調査を行う必要がある。

### 3.3 硬化コンクリートの性質

(1) 強度性質：今回の実験によって得られた圧縮強度 ( $F_c$ ) および割裂引張強度 ( $F_t$ ) の平均値と、セメント水比 ( $C/W$ ) との関係を図-7および図-9に、また、これらと鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) との関係を図-8および図-10に示す。図-7中には旧 JASS 5 (昭和44年度版) に示されている強度式： $F_c = 370 (0.61 \cdot C/W - 0.34)$ 、および後述の本実験式も併示したが、SFRCの圧縮強度の実測値は、旧 JASS 5 式による計算値ともほぼ一致している。また、図-9および図-10より明らかなように、鋼繊維混入による引張強度の増加傾向は水セメント比の低下による増大率よりも顕著である。

(2) 応力-ひずみ曲線：各シリーズ毎に平均した応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線の測定結果を図-11および図-12に示す。図-11は、水セメント比 ( $W/C$ ) が  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線に与える影響を示したものであるが、SFRCはマトリクスコンクリートに比べて著しく延性的な下降曲線を描いている<sup>9)</sup>。また、図-12は、鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) の効果を比較したものであるが、鋼繊維の効果は、混入率が1.5%の場合と0.75%の場合では大差は見られないが、本研究の目的である圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>を超えるような高強度コンクリートの靱性性能改善においても、鋼繊維混入が有効に働いていることが明らかとなった。表-2は、実験で得られた  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線の表示式としてPopovicsの提案した式<sup>9)</sup> およびそれを改良した筆者らの提案式<sup>7)</sup> を用いた場合の式中のパラメータを定量化した結果を示している。これらの式では、圧縮強度 ( $F_c$ ) を水セメント比 ( $W/C$ ) と鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) で表示し、他のパラメータを  $F_c$  と  $V_f$  の関数で表している。図-11および図-12に、本表示式を用いて計算した  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線を併示した。

(3) 圧縮タフネス：図-13は、圧縮タフネス ( $T$  : 荷重-変形曲線下の面積) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に与える水セメント比 ( $W/C$ ) および鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) の影響を示したものである。また、変形量がひずみに換算して0.75

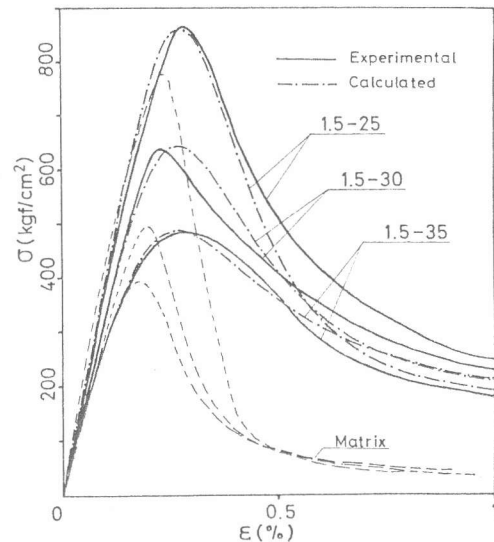


図-11 高強度SFRCの応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす水セメント比 ( $W/C$ ) の影響

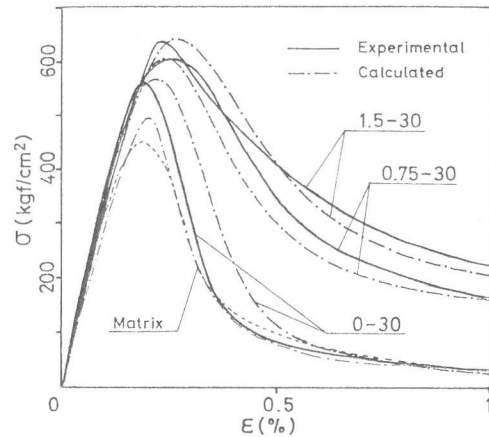


図-12 高強度SFRCの応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす鋼繊維混入率 ( $V_f$ ) の影響

％になるまでの圧縮タフネス<sup>9)</sup>に及ぼすセメント水比(C/W)および鋼繊維混入率(V<sub>f</sub>)の影響を図-14に示す。これらの図から明らかなように、コンクリートのタフネス値は、鋼繊維を1.5%混入することによって、プレーンコンクリートの約2倍になることがわかる。

(4) 乾燥収縮：図-15は、相対湿度80±5%、温度20±1℃の養生室内で10週間まで測定した乾燥収縮ひずみ(ε<sub>s</sub>)を示したものである。この図によれば、プレーンコンクリートに比較して、SFRCの乾燥収縮は約20~35%小さな値になっている。また、水セメント比が小さいものほど収縮ひずみは減少する傾向を示す。

#### 4. 結論

本報では、流動化剤を使用することによって、低水セメント比(W/C=25~35%)の鋼繊維補強コンクリートでも現場施工が十分可能であることを示すとともに、この種の高強度コンクリートの靱性改善に、鋼繊維が有効に働くことを明らかにした。

〔謝辞〕本実験に際して御助力を得た、加藤栄作君・吉藤尚登君・尾崎昇君および伊藤俊一君(三重大学生)を初め研究室の学生諸君、並びに藤沢薬品工業株式会社、富士物産株式会社、株式会社神戸製鋼所および中勢小野田レミコン株式会社に謝意を表します。本研究費の一部は、昭和58年度文部省科学研究費補助金・一般研究(C)および奨励研究(A)によったことを付記する。

#### 引用文献

- 1) Y. Tanigawa and H. Mori, "Properties of Superplasticized Steel Fiber Reinforced Concrete," Research Reports of Faculty of Engineering, Mie Univ. Vol. 8, 1983, pp. 55-62.
- 2) 谷川恭雄、森 博嗣, "流動化剤を使用した鋼繊維補強高強度コンクリートの諸性質," 日本建築学会東海支部研報, 第22号, 昭和58.2, pp. 33-36.
- 3) 服部健一、山川繁爾、飛坂基夫、清水賢作、米沢房雄, "高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの諸物性," セメント技術年報, Vol. 32, 昭和53, pp. 347-359.
- 4) 角田 忍、明石外樹樹, "超音波法によるフレッシュペーストおよびモルタルの物性変化の特性," 土木学会, 「フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム」論文集, 昭和58, pp. 41-46.
- 5) Y. Tanigawa, K. Yamada, S. Hatataka and H. Mori, "A Simple Constitutive Model of Steel Fiber Reinforced Concrete," Int'l Jour. of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 15, #2, 1983, pp. 87-96.
- 6) S. Popovics, "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete," Cem. Con. Res., Vol. 3, #5, 1973, pp. 583-599.
- 7) 谷川恭雄、畑中重光、森 博嗣, "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," コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 2, 昭和55, pp. 197-200.
- 8) JCI 鋼繊維補強コンクリート小委員会, "鋼繊維補強コンクリートに関する試験方法のJCI規準案(4)," コンクリート工学, Vol. 21, #3, 昭和58.3, pp. 4-7.

表-2 応力(σ)-ひずみ(ε)曲線の表示式

S=(n <sub>d</sub> E)/(n <sub>d</sub> -1+E <sup>n<sub>d</sub>)</sup>		(at E≤1)	by Popovics
S=1/n <sub>d</sub> +(n <sub>d</sub> -1)X/(n <sub>d</sub> -1+X <sup>n<sub>d</sub>)</sup>		(at E>1)	by authors
F <sub>c</sub>	F <sub>c</sub> =333C/W+51V <sub>f</sub> -540	ε <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub> =AF <sub>c</sub> +B
	(---(1))		
n <sub>d</sub>	n <sub>d</sub> =0.006F <sub>c</sub>		
m	m=0.5	n <sub>d</sub> =0.019F <sub>c</sub> +1	(at V <sub>f</sub> =0%)
n <sub>d</sub>	m=1	n <sub>d</sub> =(0.006-0.001V <sub>f</sub> )F <sub>c</sub> +1	(at V <sub>f</sub> >0%)

[Notes] F<sub>c</sub>: Compressive strength(kgf/cm<sup>2</sup>), ε<sub>m</sub>: Strain at F<sub>c</sub>(x10<sup>-4</sup>), S: Stress (kgf/cm<sup>2</sup>), ε: Strain(x10<sup>-4</sup>), S=σ/F<sub>c</sub>, E=ε/ε<sub>m</sub>, X=E<sup>m</sup>, m, n<sub>d</sub>, n<sub>d</sub>, A, B: Material parameters.

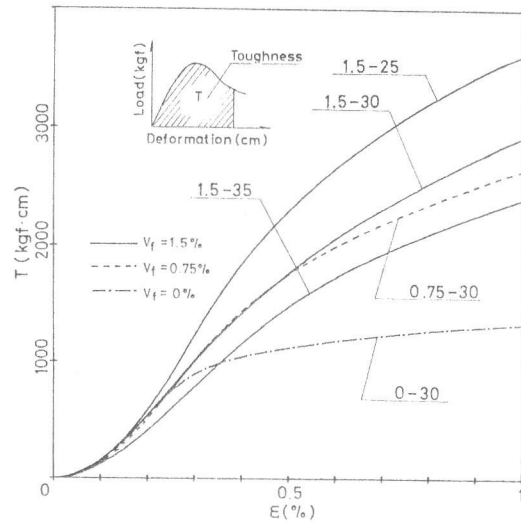


図-13 タフネス(T)-ひずみ(ε)曲線

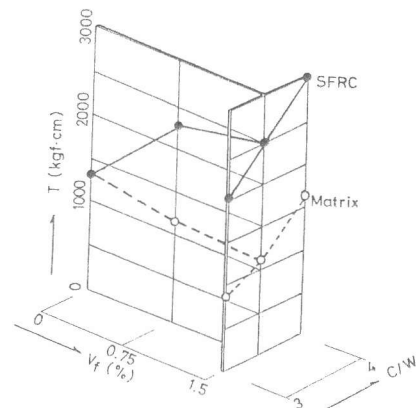


図-14 タフネス(T)に及ぼす鋼繊維混入率(V<sub>f</sub>)およびセメント水比(C/W)の影響

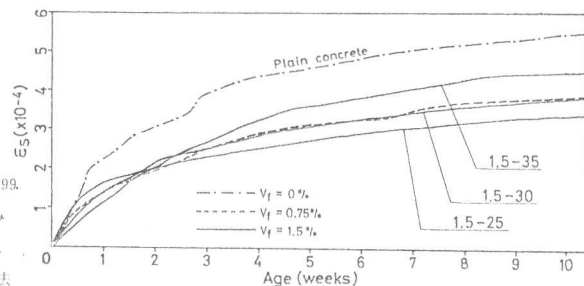


図-15 乾燥収縮ひずみ(ε<sub>s</sub>)-材令曲線