

[48] 鋼纖維と横補強筋の併用によるコンクリートのじん性改善効果

正会員 谷川 恭雄（名古屋大学工学部）
 正会員 山田 和夫（名古屋大学工学部）
 正会員 畑中 重光（Drexel University）
 正会員 ○ 森 博嗣（名古屋大学工学部）

1. まえがき

筆者らは、コンクリートの塑性変形能力を改善するための方法として、鋼纖維補強コンクリート（以下、SFRCと略記）並びに横補強筋の拘束を受けるコンクリート（以下、コンファイドコンクリートと呼ぶ）を取り上げ、一連の調査・研究を行ってきたが^{1)~7)}、本報では、鋼纖維と横補強筋を併用したコンクリート（以下、コンファイドSFRCと呼ぶ）の1軸圧縮載荷時の塑性変形挙動について報告する。

SFRCは、耐引張・曲げ特性が優れているため、主として引張や曲げを受ける部材に使用されているが⁸⁾⁹⁾、筆者らは、SFRCのもつ高圧縮じん性性能に着目し、この特性を活用しうる部材への適用を図るために若干の実験的研究を行った。その結果、コンクリートの打込み方向によってSFRCの圧縮応力度(σ)ーひずみ度(ϵ)曲線に極めて顕著な相違がみられ、SFRCは、はり部材よりもむしろ柱部材に使用した方がじん性改善効果が大きいことが明らかとなった。一方、コンクリートは、フープやスターラップなどの帶筋によって横方向の拘束力を受ける場合には、その塑性じん性性能が著しく増大することが知られている⁶⁾⁷⁾¹⁰⁾¹¹⁾。そのため、本研究では、鋼纖維と横補強筋を併用したコンファイドSFRCの高圧縮ひずみ領域に至るまでの σ - ϵ 曲線に及ぼす鋼纖維の混入率、横補強筋の間隔および降伏点強度、水セメント比などの影響を、小型柱試験体を用いて検討することにした。

2. 実験方法

2.1 試験体 本研究では、表-1に示すような実験計画に基づいて、コンファイドSFRCの高ひずみ領域に至るまでの σ - ϵ 曲線を測定した。試験体は、図-1に示すように、 $15 \times 15 \times 45$ cmの角柱体とし、横補強筋として公称直径6 mmの普通丸鋼（降伏点 = $2,500 \text{ kg/cm}^2$ ）およびPC鋼線（耐力 = $11,300 \text{ kg/cm}^2$ ）の2種類を使用した。横補強筋のかぶり厚さは0 cmとし、間隔(S)は、30, 10, 5および2.5 cmの4種類とした。また、試験体端部での局部破壊を防ぐため、いずれの試験体も両端部の7.5 cmの範囲は、公称直径6 mmの普通丸鋼で補強（間隔 = 3.75 cm）してある。本実験では、この他に $\phi 10 \times 20$ cmの円柱試験体も同時に製作した。

2.2 試験体の製作および養生方法 試験体の製作には、普通ボルトランドセメント、木曾川産の川砂（粒径 = 5 mm未満）、天龍川産の川砂利（粒径 = 5~15 mm）および鋼纖維（新日鉄製せん断ファイバー、断面 = 0.35×0.6 mm、長さ = 30 mm）を使用した。コンクリートの水セメント比(W/C)は、50, 60および70 %の3種類、鋼纖維の体積混入率(V_f)は、0, 0.75および1.5 %の3種類に変化させた。コンクリートの打込み方向は、原則として載荷軸方向（縦打ち）とし、一部の実験シリーズでは、載荷軸方向と垂直（横打ち）とした試験体も同時に製作した。角柱体は材令1日目、円柱体は材令2日

表-1 実験の概要

Series No.	W/C (%)	Vf (%)	Casting direction of concrete	Spacing of hoop (cm)	Kind of hoop
0-60	60	0			
0.75-60	60	0.75	V	30	PC wire (P)
1.5-60	60	1.5		10	
1.5-70	70	1.5	(H in a part)	5	Mild steel bar (N)
1.5-50	50	1.5		2.5	
H-1.5-60	60	1.5	H		

[Notes] W/C:Water-cement ratio, Vf:Volume fraction of steel fiber, V:Specimens cast in parallel to the loading axis, H:Specimens cast perpendicularly to the loading axis

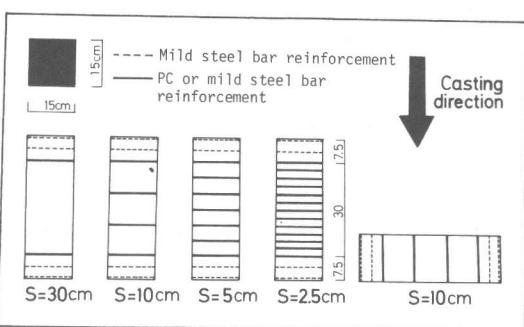
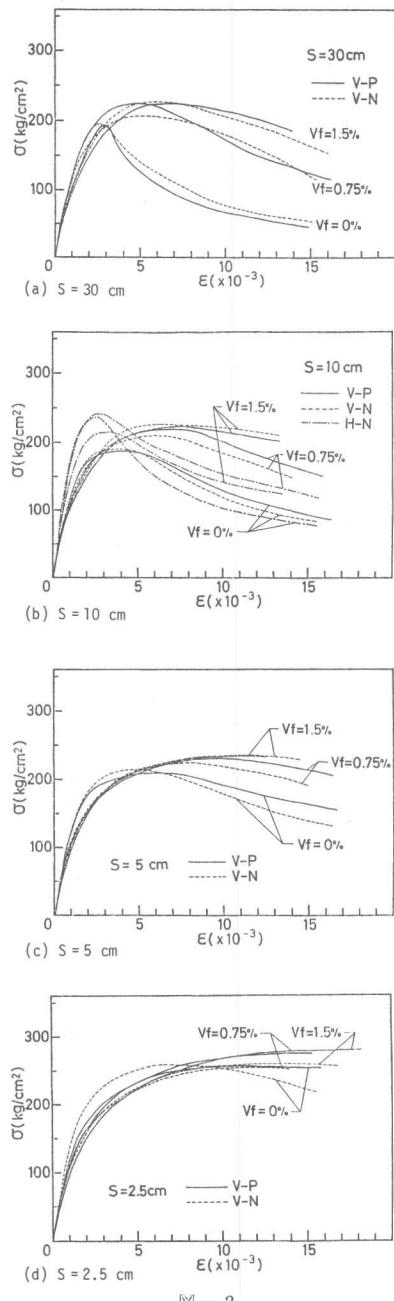


図-1 試験体

目に脱型したのち、一部の円柱体を除いては原則として空中養生とした。試験材令は、いずれも 28 日である。

2.3 載荷および測定方法

試験体の載荷には、100 t 高剛性圧縮試験機を使用し、中心軸圧縮荷重を加えた。角柱体の軸方向ひずみ度は、試験体の中央部（測定長 = 30 cm）に鋼製枠を介して取り付けた 2 個の変位変換器によって測定し、円柱体の軸方向ひずみ度も同様の方法で測定した。軸方向ひずみ度が、角柱体では 15×10^{-3} 、円柱体では 10×10^{-3} に至るまで、一定ひずみ速度（毎分約 1.7×10^{-3} ）で載荷を継続した。なお、一部の試験体では、横補強筋のひずみ度も測定した。



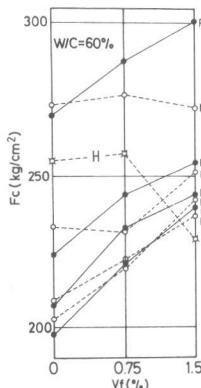
$\sigma - \varepsilon$ 曲線に及ぼす鋼纖維混入率の影響

3. 実験結果とその考察

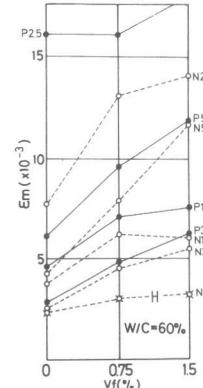
本報では、コンファインド SFRC の $\sigma - \varepsilon$ 曲線の形状に及ぼす各種要因の影響について考察を加える。

3.1 鋼纖維混入率の影響

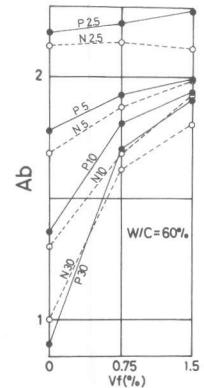
図-2(a)～(d) は、角柱体の $\sigma - \varepsilon$ 曲線に及ぼす鋼纖維の体積混入率 (V_f) の影響を各補強筋間隔 (S) ごとに示したものである。これらの図によれば、いずれの場合も鋼纖維の混入によって応力下降域における $\sigma - \varepsilon$ 曲線の形状はゆるやかになり、その効果は横補強筋の間隔が大きいほど著しい。図-3 および図-4 は、それぞれ角柱体の圧縮強度 (F_c) および圧縮強度時のひずみ度 (ε_m 、以下最大ひずみ度と呼ぶ) と鋼纖維混入率 (V_f) との関係を示したものである。図-3 から明らかなように、圧縮強度 (F_c) は、一部の試験体を除いては鋼纖維混入率 (V_f) の増加に伴って増大する傾向を示し、特に横補強筋として P C 鋼線（記号 P）を使用した試験体では、横補強筋間隔 (S) にかかわらず、ほぼ一定の強度増加がみられる。一方、普通丸鋼（記号 N）を使用した試験体のうち、横補強筋間隔が大きいものは、P C 鋼線を使用した場合とほぼ同様の強度増加傾向を示すが、間隔が小さい場合は、鋼纖維混入率が増加しても強度はそれほど増大しない。最大ひずみ度 (ε_m) は、横補強筋の種類にかかわらず、鋼纖維の混入率にはほぼ比例して増大するが、その増大率は横補強筋間隔が小さいほど大きい。図-5 は、軸方向ひずみ度が 15×10^{-3} に至るまでの $\sigma - \varepsilon$ 曲線の面積と鋼纖維混入率 (V_f) との関係を示したものである。ただし、図の縦軸は、 $S = 30 \text{ cm}$, $V_f = 0\%$ の試験体のそれで除して無次元化した値 (A_b 、以下、吸収エネルギー率と呼ぶ) を示し



F_c と V_f との関係



ε_m と V_f との関係



A_b と V_f との関係

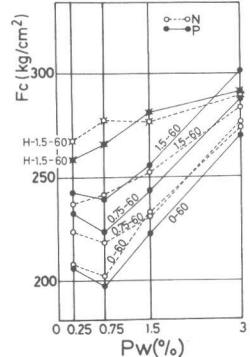
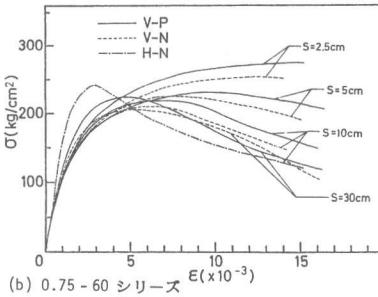
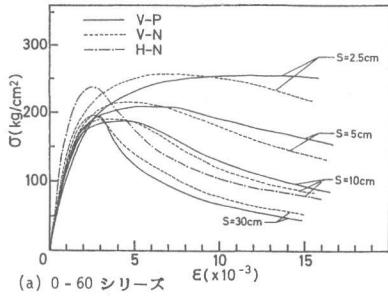


図-7 F_c と P_w との関係

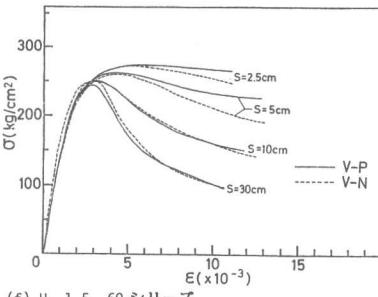
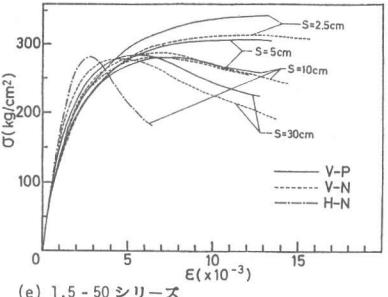
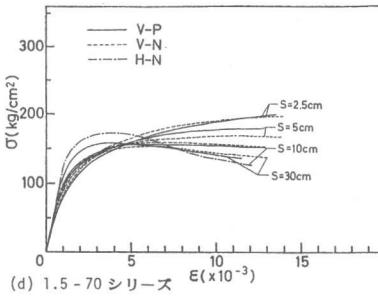
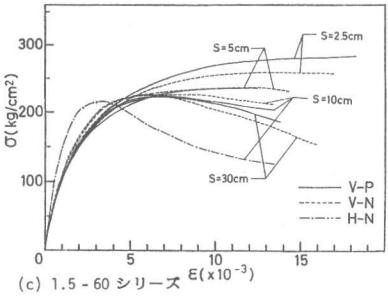


図-6 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす横補強筋間隔の影響

ている。この図によれば、吸収エネルギー率 (A_b) は、 V_f の増加に伴って直線的に増大する傾向を示すが、その増大率は、間隔 (S) が大きいほど大きい。すなわち、鋼纖維によるコンクリートのじん性改善効果は横補強筋間隔が大きい場合の方が著しい。

3.2 横補強筋間隔の影響 図-6(a)

～(f) に、コンファインド SFR C の $\sigma - \epsilon$ 曲線に与える横補強筋間隔 (S) の影響を示す。すべてのシリーズとも、間隔が小さくなるほど $\sigma - \epsilon$ 曲線の下降域における形状はゆるやかになっており、そのじん性改善効果は、 V_f および W_C の値が小さいほど顕著である。図-7、図-8 および図-9 は、それぞれ圧縮強度 (F_c)、最大ひずみ度 (ϵ_m) および吸収エネルギー率 (A_b) と横補強筋の体積比 (P_w) との関係を示したものである。これらの図によれば、 F_c 、 ϵ_m および A_b の値とも、 P_w の値に比例して増加することがわかる。図-10 は、吸収エネルギー率 (A_b) に及ぼす鋼纖維混入率 (V_f) と横補強筋比 (P_w) の相互効果について調べたものである。図中には、吸収エネルギー率に関する等高曲線が模式的に描いてあるが、この図より次のような事項が読み取れる。
① V_f および P_w の値が 1.5 % よりも小さい範囲では、コンクリートのじん性改善効果は、鋼纖維の混入による方が大きく、 $V_f = 1.0 \%$ の時の A_b の値は、 $P_w = 1.5 \%$ 時のそれには

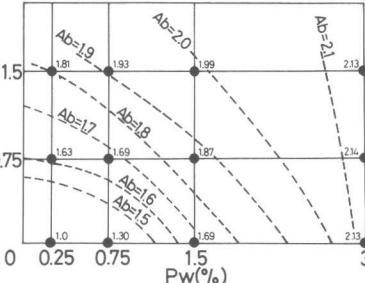


図-10 A_b 値に及ぼす V_f と P_w の効果

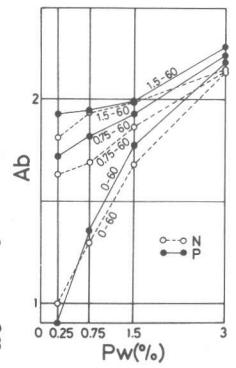


図-9 A_b と P_w との関係

ほぼ相当する。② P_w の値が大きい範囲では、 V_f を増加しても A_b の値はそれほど増大しない。③ 等高曲線は上にやや凸な形状を示すが、混入率が約15%以下の範囲では、鋼纖維と横補強筋による相乗効果が期待できると考えてよい。たとえば、 $V_f=0.75\%$, $P_w=0.75\%$ としたときの A_b の値は、 $V_f=0\%$, $P_w=1.5\%$ としたときのそれとほぼ一致する。

3.3 横補強筋降伏点の影響 前掲の各図によれば、横補強筋としてPC鋼線を使用した試験体の $\sigma-\epsilon$ 曲線は、普通丸鋼を使用した場合よりも延性的な形状を示し、その傾向は、鋼纖維混入率が大きいほど、また横補強筋間隔および水セメント比が小さいほど顕著である。

3.4 打込み方向の影響 図-2～図-4に示したように、横打ちによって製作した試験体の圧縮強度と最大ひずみ度は、鋼纖維の混入量にはほとんど影響を受けず、最大ひずみ度は縦打ちのものに比べてかなり小さな値となっている。前掲の図-7および図-8に示したように、圧縮強度および最大ひずみ度ともに、横補強筋の拘束による実験値の増加傾向は、縦打ち試験体(1.5-60シリーズ)の方が横打ち試験体(H-1.5-60シリーズ)に比べて顕著である。図-11は、PC鋼線を使用した試験体の打込み方向によるコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線の相違を示したものである。前述のように、縦打ちによる試験体の $\sigma-\epsilon$ 関係は、横打ち試験体に比べて極めて延性的な形状を示している。また、横打ち試験体のヤング係数は、縦打ち試験体のそれに比べて非常に大きくなっているが、これらの傾向は、鋼纖維の配向性とブリージングによる異方性に起因するものと考えられる。

4. 結論

本報では、1軸圧縮荷重を受ける鋼纖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-ひずみ度曲線に及ぼす鋼纖維の体積混入率、横補強筋の間隔および降伏点強度、コンクリートの打込み方向、水セメント比などの影響について考察した。これらの結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) コンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線は、鋼纖維の体積混入率が増加するほど延性的な形状を示すが、その効果は、横補強筋の間隔が大きい試験体ほど著しい。
- 2) 横補強筋によるじん性改善効果は、鋼纖維混入率が小さいほど、また水セメント比が小さいほど顕著である。
- 3) 鋼纖維混入率および横補強筋比が約15%よりも小さい範囲では、コンクリートのじん性改善効果は、鋼纖維の混入による方が大きく、 $V_f=1.0\%$ 時の吸収エネルギー率は、 $P_w=15\%$ 時のそれにはほぼ相当する。
- 4) 横補強筋としてPC鋼線を使用した試験体の $\sigma-\epsilon$ 曲線は、普通丸鋼を使用した試験体のそれより延性的な形状を示し、その傾向は、鋼纖維混入率が大きいほど、また横補強筋間隔および水セメント比が小さいほど顕著である。

なお、今後これらの特性についてさらに詳細に検討し、定量的な解析を行う予定である。

[謝辞] 実験並びにデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学生・岡田登君、岡本圭二君、柘植恭二君および増田好洋君に謝意を表します。また、本研究費の一部は、昭和54年度科研費・試験研究(1)(研究代表者・小林一輔東大教授)および昭和55年度科研費・一般研究(C)(研究代表者・谷川恭雄)によったことを付記して感謝の意を表します。

〔引用文献〕

- 1) 谷川・橋詰、鋼纖維補強コンクリートに関するシンポジウム報告集、昭52.11, pp.25-28. 2) Y.Tanigawa, K.Yamada and S.Hatanaka, Trans. of JCI, Vol. 1, 1979, pp.215-221. 3) Y.Tanigawa, K.Yamada and S.Hatanaka, Trans. of JCI, Vol.1, 1979, pp.239-246. 4) Y.Tanigawa, S.Hatanaka and H.Mori, Trans. of JCI, Vol.2, 1980, pp.187-194. 5) Y.Tanigawa, K.Yamada and S.Hatanaka, Int.Symp.on Advances in Cement-Matrix Composites, Boston, Nov.1980. 6) 小阪・谷川・馬場、セメント技術年報、第29卷、昭50, pp.322-326. 7) 谷川・小阪、セメント技術年報、第33卷、昭54, pp.456-460. 8) 小林、材料、第25卷、第277号、昭51.10, pp.937-945. 9) 河野、材料、第26卷、第290号、昭52.11, pp.937-945. 10) 六車・田中・桜井、セメント技術年報、第32卷、昭53, pp.444-448. 11) 六車・渡辺・田中・桜井・中村、セメント技術年報、第31卷、昭52, pp.462-466.

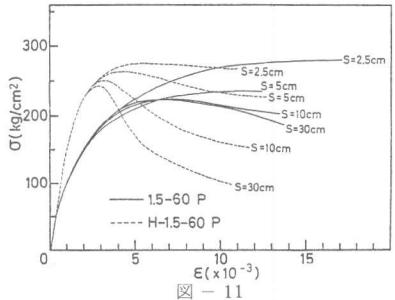


図-11 $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす打込み方向の影響