

論文 超高強度繊維補強コンクリートに関する基礎的研究

朴 成武*¹ 伊藤 利治*²

要旨：本研究は、圧縮強度 120N/mm^2 のベースコンクリートに繊維を混入した、超高強度繊維補強コンクリートの基礎的資料を得ることを目的とし、圧縮強度、曲げ強度、および引張強度等に及ぼす繊維の種類、混入率の影響について実験的検討を行ったものである。その結果、超高強度コンクリートに繊維を混入することにより、コンクリートの靱性が改善される。この特性は用いる繊維の形状、素材等によって相違することを明らかにするとともに、圧縮強度が 45N/mm^2 程度の繊維補強コンクリートと比較検討を行った。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、繊維の形状、曲げタフネス、強度特性

1. はじめに

近年、超高強度コンクリートは高性能 AE 減水剤等を用いた水セメント比の低減化や、シリカフェーム等の混和材を用いることにより比較的容易に製造することが可能である。

しかし、超高強度コンクリートは圧縮強度が大きく増大するものの、靱性等の変形性能はあまり改善が期待できない。

一方、繊維補強コンクリートでは優れた靱性、ひび割れ拘束能力を有し、曲げ強度、曲げタフネス等の曲げ特性が普通コンクリートと比べ大きく改善される。また、繊維補強コンクリートの曲げ特性は、繊維の混入率と形状寸法、及びコンクリートの配合等によって支配されることが明らかにされている¹⁾。この繊維補強コンクリートの特性を超高強度コンクリートに適用することは、靱性の改善に有効と考えられる。

そこで、本研究では、繊維補強の優れた特性に着目し、圧縮強度 120N/mm^2 のベースコンクリートに繊維を混入することで、超高強度コンクリートにおける靱性の改善を目的とし、圧縮強度、曲げ強度、引張強度試験等の実施したデータをもとに、繊維の種類、形状及び混入率等が強度特性や変形性能にお

よぼす影響について検討を行ったものである。さらに、比較のため、水セメント比 50% の繊維補強コンクリートについても同様の試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

超高強度繊維補強コンクリート（以下 H S F R C）に用いたセメントは、シリカフェームセメント（比重 3.08, M 社）で、水セメント比 50% の繊維補強コンクリート（L S F R C）には普通ポルトランドセメント（比重 3.15, T 社）を用いた。細骨材は木更津の山砂（比重 2.63, FM : 2.06）で、粗骨材は葛生産の碎石（比重 2.64, FM : 6.40）を 5~10mm, 10~15mm に分け 6 : 4 の比率で使用した。混和剤は、マイレン酸誘導体共重合物を主成分とするポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

また、短繊維は合成繊維（ビニロン）、及び鋼繊維（SF-1, 2, 3）3 種類で、各々繊維長 30mm のものを使用した。

表-1 に繊維の諸元、写真-1 に繊維の断面、写真-2 に繊維の形状を示す。

*¹ 千葉工業大学大学院修士課程 土木工学専攻 (正会員)

*² 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

2.2 配合と供試体の製作方法

コンクリートの水セメント比は、超高強度で18%、普通強度は50%とした。繊維混入率は繊維により異なるが0.5%刻みで鋼繊維は2.0%まで、ピニロン繊維では最大3.0%までとした。また、スランプは10±1.0cm、空気量5.0±0.5%を目標にした。

なお、超高強度繊維補強コンクリートの単位水量は、試験練りの結果より160kgで一定とし繊維の混入による影響をs/a、混和剤量で調整することにより所定のコンクリートを得た。表-2に用いた繊維補強コンクリートの配合を示す。

コンクリートの練り混ぜは、強制練りミキサ(100L)を用い、恒温室(20±2℃, 65±5%RH)で行った。練り混ぜ方法は、下記に示す手順でコンクリートを練った後、繊維を投入して十分に攪拌した。

超高強度	(C+S)	(W+Ad)	(G)	(F)
	30sec	120	90	120
普通強度	(C+G)	(C)	(W+Ad)	(F)
	30sec	30	120	120

曲げ供試体は10×10×40cmの角柱体、圧縮、引張供試体はφ10×20cmの円柱体で各々5本作成した。供試体の打ち込み方法は「JSCF—F552 繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方」に準拠し、型枠に一層に詰め振動台(9,000RPM)で5sec締め固めた。

強度試験は材令28日とし、試験直前まで水中養生を行う。なお、圧縮強度は試験直前に端面を研磨成形して用いた。

表-1 短繊維の諸元

	寸法 (mm)	重量 (g)	表面積 (mm ²)	アスペクト比	繊維形状	弾性係数 (GPa)	引張強度 (Mpa)	付着荷重 (kN) *
ピニロン	φ0.6×30	0.014	57.09	50	ストレート	29	600	0.295
SF-1	φ0.6×30	0.068	57.09	50	フック型	210	780	0.502
SF-2	φ0.5×30	0.070	47.49	60	波型	210	740	0.474
SF-3	φ0.6×30	0.066	57.09	50	インデント	210	1100	0.704

*繊維の付着試験における最大荷重

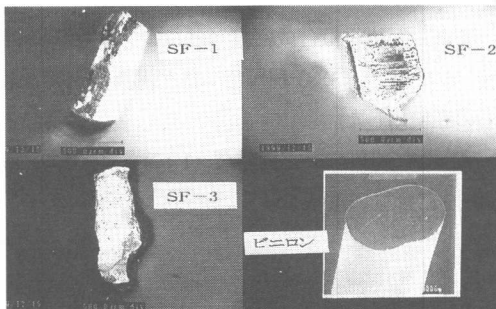


写真-1 繊維の断面

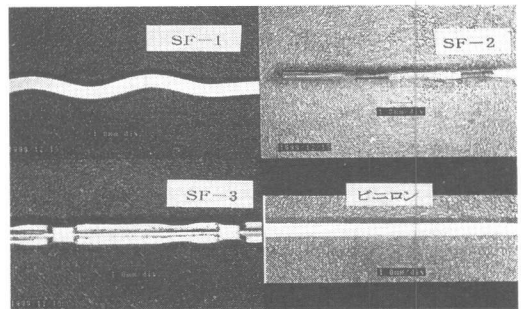


写真-2 繊維の形状

2.3 試験方法

圧縮強度は「JIS A 1108」に準じ、弾性係数はワイヤーステンゲージによるひずみ測定により求めた。引張強度試験は「JIS A 1113」に準拠し、初期ひび割れ荷重を把握するために π 型変位計 ($2000 \times 10^{-6}/\text{mm}$) を端面にセットして測定を行った。

また、曲げ強度試験、曲げタフネス試験は、「JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に準拠して行った。供試体への荷重の載荷方法は、スパンを 30cm とし、3 等分点 2 点載荷によって供試体の打設方向に対し、直角に載荷を行った。また、試験は供試体の中央点たわみが 5mm になるまで行った。

曲げタフネスは、曲げ荷重-たわみ曲線より、たわみがスパン (L) の 1/150 (2mm) となるまでの曲線と横座標軸によって囲まれた面積の大きさで表す。また、タフネス比は、プレーンコンクリート ($V_f=0\%$) のタフネスと繊維を混入した場合におけるタフネスの比として、プレーンコンクリートに対する繊維の補強効果を表す指標とした。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度と繊維混入率の関係を図-1 に示す。図より、マトリックス強度が大きい場合の圧縮強度は繊維混入率の増加とともに同等もしくはやや低下している。ピニロン繊維を用いるとその傾向は大きく、繊維量 3.0% ではおよそ $10\text{N}/\text{mm}^2$ 低下している。これに対しマトリックス強度が小さい場合は、繊維の混入が圧縮強度に及ぼす影響はほとんど認められない。その理由として、マトリックスに比べ繊維の弾性係数が小さいこと、さらに、繊維量を著しく増加させた場合には、練り混ぜ及び締め固め不足等が影響したものと考えられる。

一方、圧縮強度の 1/3 で求めた弾性係数はおよそ $86\sim 93\text{GPa}$ で鋼繊維は混入率の増加に従って大きくなる。しかし、ピニロン繊維を混入する場合には繊維混入率 3.0% までの範囲ではほとんど変化は認められない。

表-2 繊維補強コンクリートの配合

Vf (%)	W/C=50%			W/C=18%		
	s/a (%)	W (kg)	混和剤* (%)	s/a (%)	W (kg)	混和剤* (%)
0.0	50	179	0.9	30	160	1.08
0.5	56	192	0.9	34	160	1.10
1.0	60	200	0.9	38	160	1.15
1.5	64	208	0.9	42	160	1.25
2.0	68	214	0.9	46	160	1.42
2.5	72	220	0.9	50	160	1.67
3.0	76	226	0.9	54	160	2.08

*セメントに対する重量 (%)

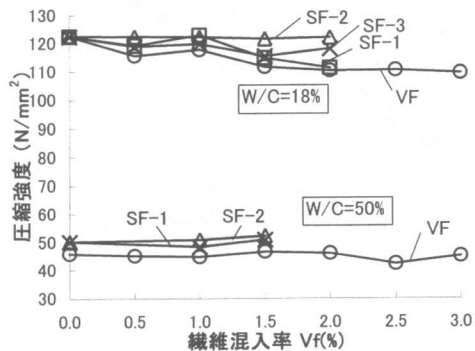


図-1 繊維混入率と圧縮強度の関係

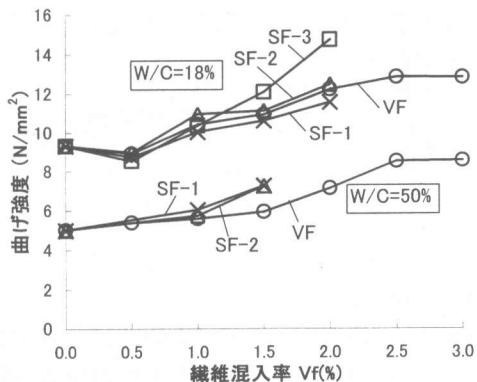


図-2 繊維混入率と曲げ強度の関係

表-3 曲げタフネス比一覧表

繊維の種類	W/C (%)	繊維混入率 (%)						
		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
ビニロン	18	1	19.5	32.3	44.8	58.4	69.4	71.6
SF-1		1	20.3	34.6	43.7	52.0	—	—
SF-2		1	12.5	21.1	27.4	40.3	—	—
SF-3		1	23.1	35.0	56.5	66.4	—	—
ビニロン	50	1	28.6	41.5	51.9	83.2	115.3	123.0
SF-1		1	—	55.5	83.8	—	—	—
SF-2		1	—	46.3	70.4	—	—	—

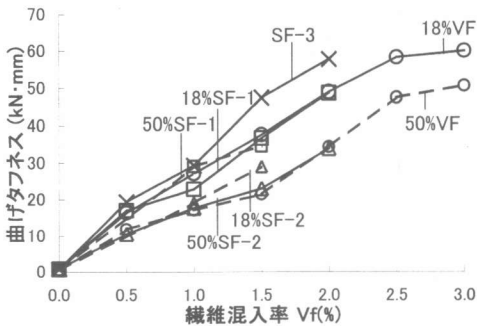


図-3 曲げタフネスと繊維混入率の関係

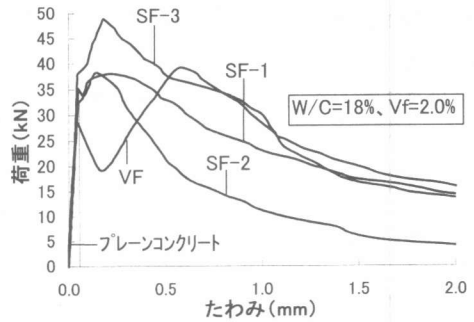


図-4 各種繊維の荷重-たわみ曲線

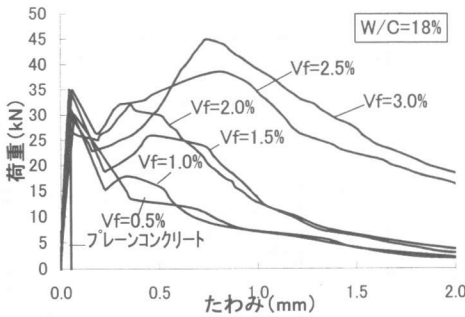


図-5 ビニロンの荷重-たわみ曲線

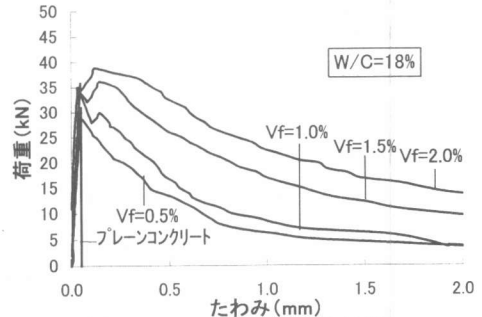


図-6 SF-1の荷重-たわみ曲線

3.2 曲げ強度

図-2は、繊維混入率と曲げ強度の関係を示したものである。図より、マトリックス強度の増大、繊維量の増加はともに、曲げ強度に大きく寄与し増加している。

しかし、その傾向は繊維の特性により異なり、W/C=50%において、曲げ強度はビニロン繊維と比較して鋼繊維 SF-1、SF-2 の方が大きいにもかかわらず、マトリックスの強度が大きくなると、同程度の

曲げ強度となっている。また、繊維 SF-3 の増加量が著しく大きいことより分かるように、HSFRC の曲げ強度は繊維の引張強度及び付着強度²⁾が影響していると考えられる。

これらのことより曲げ靱性の改善の程度は、繊維の特性により相違し、曲げ強度のみで断ずることは無理が生じると思われる。

図-3 に曲げタフネスと繊維混入率との関係について示した。図より、曲げタフネスは繊維の種類を

問わず混入量の増加とともに増大し、靱性が大幅に改善していることが分かる。しかし、詳細に検討を行うと、マトリックスの強度及び繊維の特性により、その傾向は異なっている。すなわち、繊維の引張強度及び付着強度の大きい SF-3 は混入量の増加ともタフネスが急激に増加している。

表-3は繊維の混入率と曲げタフネス比の関係を示した。マトリックス強度の小さい場合に曲げ強度がピニロン繊維より大きい SF-1, SF-2 は、マトリックス強度が増大してもタフネス比はピニロン繊維と同等かやや小さいことは、繊維の付着強度などが影響しているものと考えられる。

図-4~8に超高強度繊維補強コンクリートの「荷重-たわみ曲線」を示したものである。繊維補強コンクリートへの繊維混入による効果は強度よりも変形に顕著に現れると報告³⁾されている。図より繊維ごとの「荷重-たわみ曲線」において、明らかにピーク荷重が認められる。すなわち、最初のピーク荷重は初期ひび割れ発生荷重時に現れ、その後、荷重が低下しながら変形が進行する。繊維混入量が増えると、ひび割れ発生以降に再度荷重が増加し始め、2つ目のピーク荷重が現れる。この「荷重-変形」過程は繊維の種類、混入率などにより異なっている。繊維混入率0%の場合において、ひび割れ発生荷重に達した後、急激に荷重は低下し脆性破壊が生じていることより比較してみても、繊維混入率の増加とともに繊維の補強効果が変形性能によく現れることを示している。

図-4は繊維ごとの混入量を2.0%で一定とした場合における「荷重-たわみ曲線」を示した。詳細に検討すると、繊維特性が「荷重-たわみ曲線」へ与える影響が顕著となった。ピニロン繊維は、鋼繊維を比較すると初期ひび割れの発生以降に荷重の低下が大きく、それ以降、再度ピーク荷重まで荷重

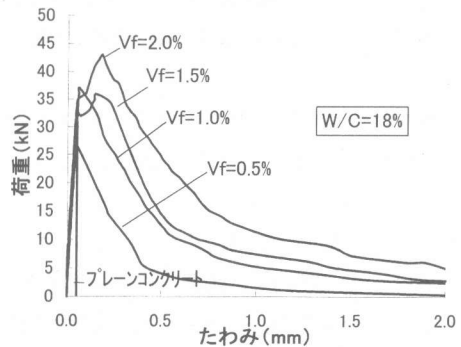


図-7 SF-2の荷重-たわみ曲線

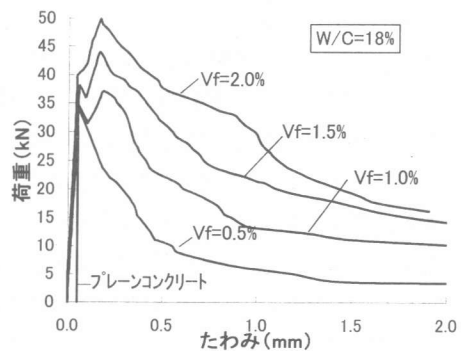


図-8 SF-3の荷重-たわみ曲線

が増加し始めるが、最大荷重発生までのたわみ量が鋼繊維よりも大となる。

図-5~8に繊維の混入率が「荷重-たわみ曲線」に及ぼす影響を示す。どの繊維も繊維量が増すと、初期ひび割れ荷重が増加する傾向が見られる。これは、繊維がマトリックスの応力を分担することによるものと考えられる。また、繊維量が大きくなる程、降下域における曲線の傾斜が緩やかとなり、靱性が大きく改善されることが分かる。特に、ピニロン繊維は混入量を増すほど2度目のピーク（最大荷重）が顕著に現れる。この理由として、ピニロン繊維の強度、弾性係数がマトリックスに比べ小さいことによるものと考えられる。

3.3 引張強度

図-9は割裂試験より求めた繊維補強コンクリートの繊維混入率と引張強度の関係について示した。図より、引張強度は繊維混入率とともに増大するが、マトリックスの強度によりその傾向は異なっている。

すなわち、鋼繊維を用いた場合にはマトリックスの強度が大きい程、引張強度は繊維量とともに増大している。しかし、マトリックスの強度が小さくなると、その傾向は緩やかとなっている。これに対して、ビニロン繊維を用いた場合の引張強度は、マトリックスの強度が大きくなって、鋼繊維と比べ増加の傾向は非常に小さく、マトリックスの強度の小さな場合の方が大きい。

また、マトリックス強度が大きいコンクリートの引張強度試験において、鋼繊維の混入による影響は、初期ひび割れ発生強度と最大引張強度の間に顕著な強度差を生じさせているものと認められた。特に、鋼繊維の繊維量を増大させた場合、付着強度の大きい繊維になる程、その強度差が大きくなり、その差はSF-3 ($V_f=2.0\%$)でおよそ 4.0N/mm^2 程度となった。また、付着強度の小さい繊維 SF-1, SF-2 ではその差がおよそ $1\sim 2\text{N/mm}^2$ である。これに対して、ビニロン繊維では、 $V_f=2.0\%$ まではほとんど強度差が認められず、 $V_f=3.0\%$ の時、その差が約 1.5N/mm^2 であった。このような強度差の生じる要因として、

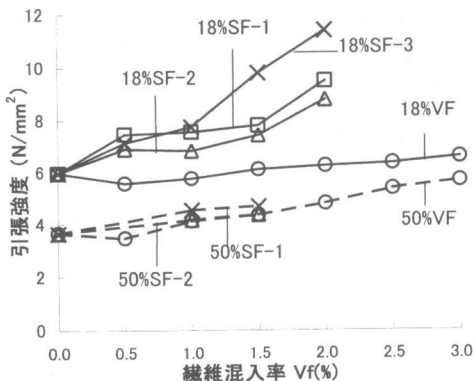


図-9 繊維混入率と引張強度の関係

マトリックスの強度に比べ繊維の強度、弾性係数、そして付着強度などの影響が大きいものと考えられる。

4. まとめ

超高強度繊維補強コンクリートの基礎的知見を得ることを目的に実験的検討を行った。

以下に得られた結果を示す。

- 1) 超高強度繊維補強コンクリートの強度特性は、繊維の形状に影響されることが明らかとなった。
- 2) 圧縮強度に及ぼす繊維量の影響は、鋼繊維については認められない、しかし、合成繊維では強度の低下することが確認された。
- 3) 曲げ強度、引張強度に及ぼす繊維の影響は、繊維の引張強度、付着強度、弾性係数等によって左右されることを明らかにした。
- 4) 弾性係数の小さな合成繊維を混入した場合は、鋼繊維に比べ引張強度がやや劣る。
- 5) 超高強度コンクリートに繊維を混入することにより、脆性が改善された。しかし、使用に際してはマトリックスの強度が大きいことより、繊維の引張強度、付着強度、弾性係数等を考慮する必要がある。

謝辞

本研究の実施に当り、セメントおよび繊維を提供して頂いた各社に感謝いたします。また、多大な御協力を頂いた研究室の皆様、特に松井 慶君・澤栗 周平君・山根 雅之君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート(オーム社)
- 2) 未発表資料：千葉工業大学土木工学科卒論
- 3) Ito Toshiji：Study on Vinylon Short Fibre - Reinforced Concrete, Proceedings of the International Conference on Fiber Reinforced Concrete, pp.21-26 Nov.1997