

## 種々の短繊維を用いた早強コンクリートの力学的特性

三井住友建設(株)	正会員	修(工)	○佐々木 亘
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	谷口 秀明
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	樋口 正典
京都大学大学院	正会員	工博	宮川 豊章

Abstract : This paper describes the examination results of influence of various short fibers on mechanical properties of fiber reinforced early-strength concrete. Its design strength is about 40 N/mm<sup>2</sup> for PC superstructures, and the short fiber is steel, PVA or aramid fiber. As a result, followings were obtained; 1) The influence of short fibers on compressive strength, Young's modulus or split cracking strength is small, 2) The length of the small diameter steel fiber is shorter than maximum size of aggregate, nevertheless this fiber has a high reinforcement effect, 3) Aramid strand short fiber has a reinforcement effect comparable to steel fiber, 4) There is some possibility of estimating the reinforcement effect of short fiber with using the product of fiber content and aspect ratio.

Keywords : Fiber Reinforced Concrete, Small Diameter Steel Fiber, Aramid Fiber, Mechanical Characteristics

## 1. はじめに

短繊維をコンクリートやモルタル中に均一に分散させると、引張強度、曲げ強度、せん断強度、ひび割れの抑制、じん性、耐衝撃性などの様々な性能を改善できることは古くから知られており、盛んに研究が行われてきた<sup>1)</sup>。最近では、設計基準強度 180N/mm<sup>2</sup> という高い圧縮強度を持ち、鋼繊維を比較的少量に混入することにより高い引張強度やじん性を付与した超高強度繊維補強コンクリート (UFC)<sup>2)</sup> が実用化され、道路橋等への適用<sup>3)</sup> も始まっている。

筆者らは、通常のコンクリートから UFC で対象とする高い圧縮強度までの間を補完する短繊維補強コンクリートの検討を進めている<sup>4)</sup>。その中で、これまで粗骨材を含むコンクリートに対して適用されることは少なかったと思われる細径の鋼繊維や集束アラミド繊維が、高強度繊維補強コンクリートに使用する短繊維として有効であることを確認してきた。本研究では、より一般的な強度域を対象とし、それらの短繊維が、PC 上部構造物に使用される設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> 程度の早強コンクリートの力学特性に与える影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験で使用した短繊維を表-1に示す。普通鋼繊維はトンネル覆工等で用いられている一般的なものであり、両端にフック状の加工がされているものである。高強度鋼繊維は普通鋼繊維と形状は同一であるが、引張強度が高く繊維径は小さい。指針案<sup>5)</sup>に基づいて粗骨材最大寸法を考慮し、繊維長はいずれも 30mm のものを用いた。一方、細径鋼繊維は、一般的には粗骨材を用いない UFC に使用されるタイプの鋼繊維である。繊維長は粗骨材最大寸法の 3/2 倍以上とするのが一般的<sup>6)</sup>であるが、細径鋼繊維の繊維長は SWA が 22mm、SWB が 15mm であり、粗骨材最大寸法と同程度またはそれより短い。繊維長は短い繊維径が 0.2mm と小さいため、アスペクト比は比較的大きくなっている。

合成繊維として、PVA 繊維およびアラミド繊維を用いた。PVA 繊維はコンクリートの補強用として一般的に用いられているものである。アラミド繊維は高強度・高剛性を有する高性能繊維のうち、コンクリート補

強用として比較的入手がしやすいことなどから選定したものである。用いたアラミド繊維は、繊維径 0.012mm のパラ型アラミド繊維 (コポリパラフェニレン・3.4' オキシジフェニレン・テレフタラミド) をエポキシ系樹脂により集束し、所定の繊維径としたものである。繊維径および繊維長は普通鋼繊維や PVA 繊維と比較的に近い値とした。

短繊維以外の材料を表-2に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材は山砂と砕砂の混合 (容積比率 4:6)、粗骨材は砕石 2005 である。高性能 AE 減水剤および AE 剤を使用して、スランプと空気量の調整を行った。

2.2 コンクリートの条件

コンクリートの配合を表-3に示す。以下、配合名は表-3に示した記号で称す。PC 上部工に使用される設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> 程度の早強コンクリートを想定し、水セメント比は 40%とした。短繊維を使用しない配合 Base の単位水量 (記号: W) は、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に示される標準範囲 (155~175kg/m<sup>3</sup>) の中心値である 165kg/m<sup>3</sup>とし、単位粗骨材絶対容積 (記号: V<sub>G</sub>) は 0.370m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。スランプは 12±2cm 程度である。

短繊維の混入にあたっては、筆者らの行った PVA 繊維を用いた短繊維補強コンクリートの検討<sup>7)</sup>の結果を踏まえ、普通鋼繊維および PVA 繊維を使用する場合には W=175kg/m<sup>3</sup>とし、短繊維混入率 (容積百分率, 記号: V<sub>f</sub>) 0.1% の増加に対して V<sub>G</sub> を 0.007m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 程度低減することとした。高性能 AE 減水剤の使用量も文献

7) に準じて設定した。配合 Fb0 は SFA1.5 または VF1.5 から短繊維を除いた配合であり、短繊維混入に伴う配合変化の影響を検討する目的で設定したものである。

同じ短繊維混入率であっても、繊維径が小さくなるに従ってコンクリート中に含まれる短繊維の表面積の総和は大きくなる。このことから、繊維径の小さい短繊維を用いた場合には流動性の低下が大きくなることが考えられる。したがって鋼繊維の種類によって、繊維径が小さいほど V<sub>G</sub> の低減量を大きくし、細径鋼繊維では V<sub>f</sub> によらず V<sub>G</sub>=0.200m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 一定とした。アラミド繊維についても同様であり、高強度コンクリートでの検討結果<sup>8)</sup>からも流動性に与える影響が大きいと考えられたため、AF0.5 および AF1.0 では V<sub>G</sub> の低減量を大

表-1 使用した短繊維

記号	種類	繊維径 D (mm)	繊維長 L (mm)	アスペクト比 L/D	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
SFA	普通鋼繊維	0.62	30	48	1100	200	7.85
SFB	高強度鋼繊維	0.38	30	79	2610~3190	200	7.83
SWA	細径鋼繊維	0.2	22	110	2000 以上	200	7.86
SWB			15	75			
VF	PVA 繊維	0.66	30	45	900	23	1.30
AF	アラミド繊維	0.5	30	60	3410	74	1.39

注) アラミド繊維の引張強度, 弾性係数は集束していない単繊維の値である。

表-2 短繊維以外の使用材料

材料	種類	産地, 物性, 成分	密度	記号
水	上水道水	千葉県流山市	1.0	W
セメント	早強ポルトランドセメント	比表面積 4640cm <sup>2</sup> /g	3.13	C
細骨材	山砂	千葉県富津産, 吸水率 1.87%	2.63	S1
	砕砂	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 1.68%	2.61	S2
粗骨材	砕石 2005	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 0.96%	2.64	G
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	-	SP
	AE 剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	-	AE

注) 骨材の密度は表乾密度である。

表-3 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>G</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	SP (C×%)	短繊維の種類	V <sub>f</sub> (%)
Base		165	0.370	0.7	-	0
Fb0			0.260	1.5	-	0
SFA0.5	40	175	0.335	0.7	SFA	0.50
SFA1.0			0.300	0.9		1.00
SFA1.5			0.260	1.5		1.50
SFB1.0			0.300	0.9	SFB	1.00
SWA0.5			0.200	1.5	SWA	0.50
SWA0.75				1.7		0.75
SWA1.0				2.0		1.00
SWB0.5				1.3	SWB	0.50
SWB0.75				1.5		0.75
SWB1.0				1.7		1.00
VF1.5			0.260	1.5	VF	1.50
AF0.5			0.300	0.7	AF	0.50
AF1.0			0.260	1.2		1.00
AF1.5			0.260	1.5		1.50

きくした。ただしAF1.5については、比較のためSFA1.5およびVF1.5と同様の配合とした。

すべての配合で空気量の設計値は4.5%であり、AE剤を用いて±1.0%程度に調整した。

### 2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜには、公称容積100リットルの強制2軸ミキサを使用し、空練りを10秒、モルタル練りを90秒、コンクリート練りを90秒行った。短繊維を使用する場合には、これを含まない状態のコンクリート練りを終えた後、短繊維を全量投入し、さらに60秒の練混ぜを行った。コンクリートの練混ぜ後、ただちにフレッシュ性状の確認および力学特性確認のための供試体を製作した。各供試体は材齢1日で脱型後、所定の材齢まで標準水中養生を行った。力学特性の確認は、圧縮強度試験(JIS A 1108)、静弾性係数試験(JIS A 1149)、割裂引張強度試験(JIS A 1113)、曲げ強度および曲げタフネス試験(JSCE-G552)およびせん断強度試験(JSCE-G553)に準じて行った。各試験は材齢28日で行った。なお、割裂引張強度試験ではひび割れ発生強度を求めることとし、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)<sup>2)</sup>を参考に、供試体端面のひずみを計測し、ひずみ変化が不連続になった応力を割裂ひび割れ発生強度とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮強度

$V_f$ と圧縮強度の関係を図-1に示す。短繊維を用いないBaseおよびFb0については $V_f$ に関係なく図示しており、これ以降の図でも同様である。普通鋼繊維(SFA)、高強度鋼繊維(SFB)、PVA繊維(VF)およびアラミド繊維(AF)については、短繊維の種類による圧縮強度の差異はみられず、 $V_f$ の増加にしたがって圧縮強度も増加する傾向が見られる。しかし、短繊維は用いず $V_G$ を減じたFb0の圧縮強度も増加しており、その増加の程度は各繊維の混入による増加と同程度である。つまり、これらの圧縮強度の増加は、 $V_f$ の増加に伴って減じた $V_G$ の影響が大きいと考えられる。アラミド繊維(AF)については、高強度コンクリートへ適用した場合は $V_f$ の増加に伴って圧縮強度が低下する傾向がみられた<sup>4)</sup>が、本実験ではそのような傾向はみられなかった。

一方、細径鋼繊維(SWAおよびSWB)を用いた場合は他の配合に比べ圧縮強度が大きい。繊維長の大きいSWAのほうが若干圧縮強度が高いものの、繊維長の影響は小さいようである。 $V_f=0.75\%$ の場合に $V_f=0.5\%$ に比べ圧縮強度の低下がみられるが、フレッシュ時の空気量が他の $V_f$ に比べ若干大きく、そのことが圧縮強度に影響したものと考えられる。

図-2は圧縮強度試験時の応力-ひずみ関係の一例である。BaseとSWA1.0を比較すると、細径鋼繊維の混入により高い応力域まで剛性の変化が小さく、また、圧縮強度時のひずみも30%程度大きくなっている。Fb0と比較すると、その差異はより顕著になっていることがわかる。これらのことより、細径鋼繊維が供試体の変形を拘束し、圧縮強度の増加に寄与していると考えられる。

### 3.2 静弾性係数

$V_f$ と静弾性係数の関係を図-3に示す。いずれの短繊維であっても、 $V_f$ と静弾性係数の間に明確な傾向は見られない。Baseに対してFb0の静弾性係数が小さいことに着目し、 $V_G$ と静弾性係数の関係を示したものが図-4である。この図において静弾性係数はBaseを1とした比の値で表示している。また、筆者らの一人が行った、短繊維を用いないW/C=40%のコンクリートについて $V_G$ と静弾

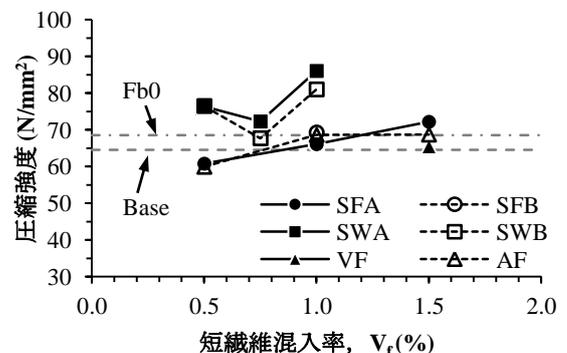


図-1  $V_f$ と圧縮強度の関係

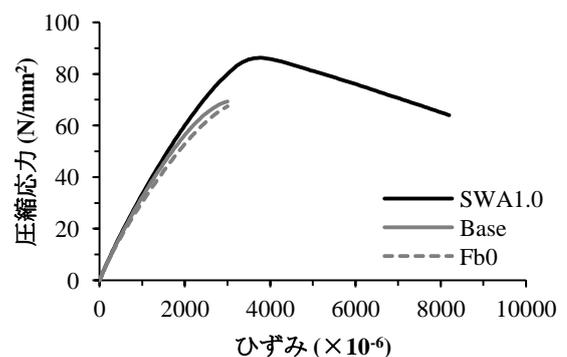


図-2 圧縮強度試験における応力-ひずみ関係の一例

性係数の関係を調べた実験結果<sup>9)</sup>もあわせて示した。

短繊維を用いないBase および Fb0 や文献[9]のデータから、 $V_G$ の減少に伴って静弾性係数が低下する傾向にあることがわかる。ただし、本実験と文献[9]では使用している骨材が異なるため、低下の度合いは異なる。普通鋼繊維(SFA)、高強度鋼繊維(SFB)、PVA 繊維(VF)およびアラミド繊維(AF)を用いた場合の静弾性係数は、Base と同程度もしくは低下しており、 $V_G$ の減少の影響であると考えられる。しかし、細径鋼繊維(SWA および SWB)については、静弾性係数比が1.0より大きくなる結果も得られている。これは、図-2で示したように、細径鋼繊維による変形の拘束効果が大きく、 $V_G$ の影響を上回ったことによるものと考えられる。

### 3.3 割裂ひび割れ発生強度

$V_f$ と割裂ひび割れ発生強度の関係を図-5に示す。一般のコンクリートでは、粗骨材量の増加は脆弱な遷移帯の増加に繋がるため、割裂引張強度は低下する傾向にある<sup>10)</sup>。短繊維を用いない場合、割裂引張強度と割裂ひび割れ発生強度はほぼ等しくなるため、本実験においても、Baseと比較してFb0では割裂ひび割れ発生強度が大きくなっている。

短繊維を用いた場合では、たとえば普通鋼繊維(SFA)では $V_f$ の増加に伴って割裂ひび割れ発生強度も増加する傾向が見られるが、BaseとFb0の差と同程度であり、 $V_G$ の減少の影響が大きいと考えられる。一方、細径鋼繊維(SWA および SWB)においても、 $V_f$ の増加に伴い割裂ひび割れ発生強度が増加しているが、細径鋼繊維を用いた配合では $V_f$ によらず $V_G$ は一定である。したがって、 $V_G$ の減少の影響だけでなく、細径鋼繊維の混入によって割裂ひび割れ発生強度が増加していると考えられる。繊維長の影響については明確ではなかった。

### 3.4 曲げひび割れ発生強度および曲げ強度

$V_f$ と曲げひび割れ発生強度の関係を図-6に、 $V_f$ と曲げ強度の関係を図-7に示す。曲げひび割れ発生強度は、供試体の引張縁にひずみゲージを貼り付け、ひずみ変化が不連続になった点から判断した。なお、曲げ破壊後の破壊面を観察すると、PVA 繊維以外の短繊維は破断することなく抜け出していたが、PVA 繊維については、破断していると考えられるものも観察された。

曲げひび割れ発生強度については、前述の割裂ひび割れ発生強度と比較して、BaseとFb0の関係から $V_G$ の影響は小さく、 $V_f$ との間にも明確な傾向は見られなかった。一方、曲げ強度については、 $V_G$ の影響が小さいのは同様であるが、 $V_f$ の影響は明確に現れた。鋼繊維に着目すると、普通鋼繊維(SFA)の $V_f=1.0\%$ 以下、細径鋼繊維(SWA および SWB)の $V_f=0.5\%$ ではBaseと同程度であり、 $V_f$ がそれらを上回ると曲げ強度も増加している。短繊維の架橋効果によって、曲げひび割れの発生以降、荷重の保持または増加とともにたわみが増加する。図-7より、短繊維によって、短繊維による荷重増加がひび割れ発生荷重を上回る $V_f$ が存在することを示している。細径鋼繊維は繊維長が短いにも関わらず、他の鋼繊維に比べ高い補強効果を有していることが

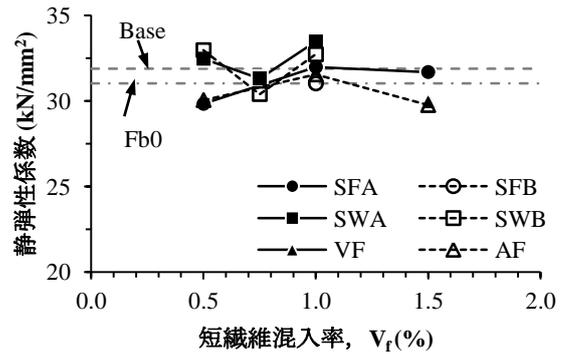


図-3  $V_f$ と静弾性係数の関係

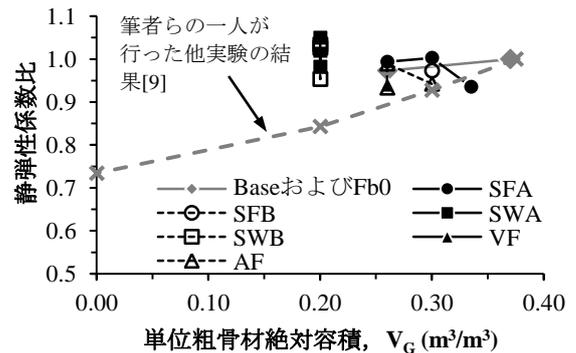


図-4  $V_G$ と静弾性係数比の関係

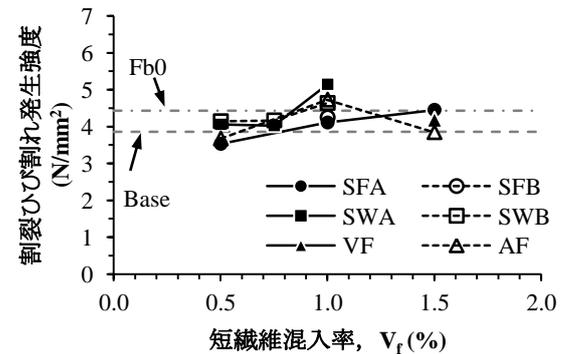


図-5  $V_f$ と割裂ひび割れ発生強度の関係

わかった。

合成繊維では、PVA 繊維(VF)は  $V_f=1.5\%$  であっても曲げ強度としては Base と同程度であった。W/C=40%では、PVA 繊維は  $V_f=1.5\%$  まで高めても、曲げ強度が Base より大きくなる。すなわち、繊維の架橋による曲げ応力がひび割れ発生強度を上回らないことが分かる。これに対し、アラミド繊維(AF)を用いると、 $V_f=0.5\%$ より大きい  $V_f$  で曲げ強度が Base より大きくなり、普通鋼繊維(SF)を上回る結果が得られた。本実験で用いたアラミド繊維は、W/C=40%のコンクリートが対象であっても一般的な鋼繊維を上回る補強効果を有していることがわかった。

### 3.5 せん断強度

$V_f$  とせん断強度の関係を図-8に示す。せん断強度も曲げ強度の場合と同様に  $V_f$  の影響が明確に現れた。Base と Fb0 の比較より、 $V_f$  が小さくなるとせん断強度も小さくなる傾向にあるが、短繊維を混入すると  $V_f$  が小さくなっているにも関わらず大きなせん断強度が得られることから、短繊維によるせん断補強効果の大きいことがわかる。鋼繊維に着目すると、任意の  $V_f$  では細径鋼繊維(SWA および SWB) > 高強度鋼繊維(SFB) > 普通鋼繊維(SFA) の順に補強効果が高く、細径鋼繊維では繊維長が長いほうが、せん断強度が高くなった。アラミド繊維(AF)は普通鋼繊維(VF)と同程度であり、PVA 繊維(VF)を  $V_f=1.5\%$  混入した場合のせん断強度は、Base より大きい値が得られるものの、アラミド繊維(AF)や普通鋼繊維(SFA)を  $V_f=0.5\%$  とした場合と同程度のせん断強度であった。

### 4. 短繊維の形状寸法を含めた補強効果の評価

図-9は、短繊維混入率とアスペクト比の積  $V_f \cdot L/D$  と曲げ強度、曲げ強度試験から求めた曲げじん性係数およびせん断強度の関係である。鋼繊維に着目すると、形状寸法の違いによらず  $V_f \cdot L/D$  の増加に伴って曲げ強度等も増加する傾向が見られた。また、アラミド繊維(AF)は鋼繊維と同程度の補強効果を有していることもわかる。PVA 繊維(VF)は曲げに対する補強効果は鋼繊維およびアラミド繊維に比して小さいものの、せん断に対する補強効果は比較的大きいことがわかる。

このように、短繊維混入率とアスペクト比の積  $V_f \cdot L/D$  によって、形状寸法の違いによらず、短繊維の補強効果を簡易的に評価できる可能性がある。ここで、 $V_f \cdot L/D$  の物理的意味を考えると以下のようなものである。今、ひび割れ断面を短繊維が破断せずに架橋している状況を考える。ただし、簡単のために、短繊維は1方向に配向しているとする。このとき、繊維長  $L$ 、繊維径  $D$ 、短繊維に生じる引張応力度  $\sigma$ 、短繊維のマトリクスに対する付着応力度  $\tau$  の間には次の関係が成立する<sup>1)</sup>。

$$\frac{L}{D} = \frac{\sigma}{\tau} \quad (1)$$

ここで式(1)の両辺に  $V_f$  を乗じる。このとき  $\sigma V_f$  は着目断面に生じている引張力となり、右辺は引張力を短繊維とマトリクスの付着応力で除した値、すなわちひび割れ断面から突出している短繊維の表面積を表す。

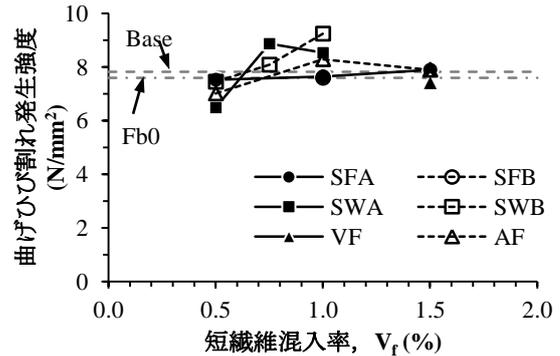


図-6  $V_f$  と曲げひび割れ発生強度の関係

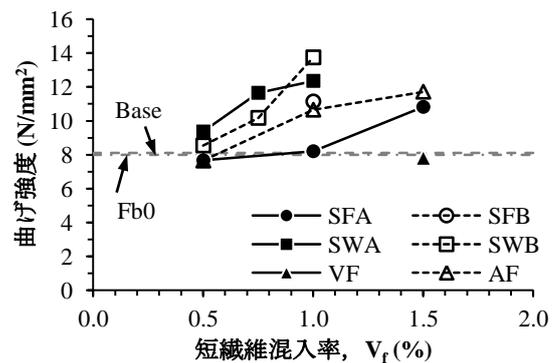


図-7  $V_f$  と曲げ強度の関係

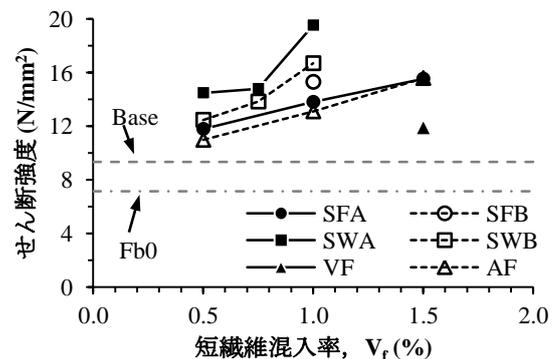


図-8  $V_f$  とせん断強度の関係

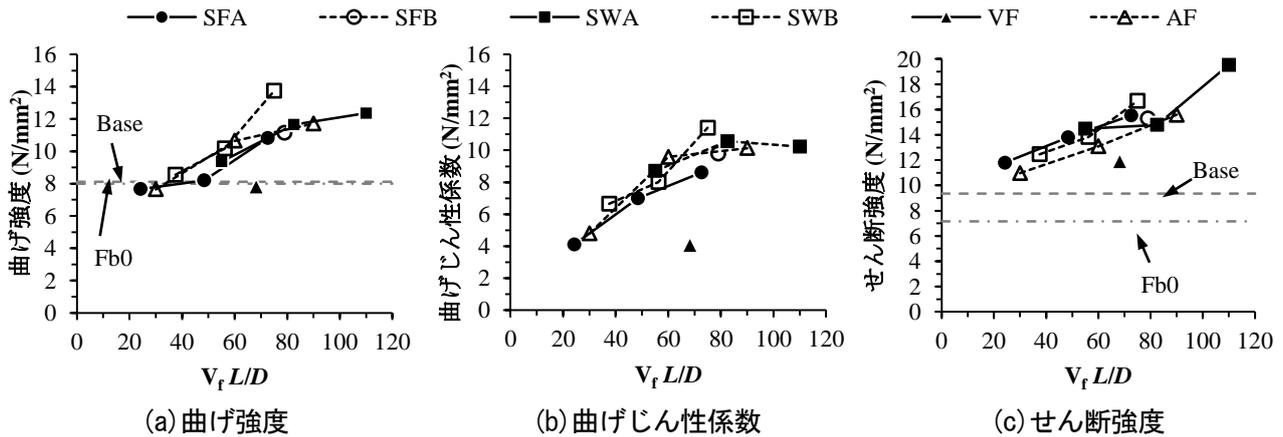


図-9  $V_f \cdot L/D$ と曲げ強度、曲げじん性係数およびせん断強度の関係

したがって、 $V_f \cdot L/D$ は、ひび割れ断面から突出している短繊維の表面積と同値であることがわかる。

### 5. まとめ

繊維長が粗骨材の最大寸法以下となる細径鋼繊維および集束アラミド繊維に着目し、水セメント比 40%の早強コンクリートの力学特性に与える種々の短繊維の影響について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 圧縮強度、静弾性係数および割裂ひび割れ発生強度に対する短繊維の影響は間接的であり、短繊維混入に伴う単位粗骨材絶対容積の変化の影響が大きい。ただし、細径鋼繊維を混入した場合には、短繊維混入に伴う圧縮強度等の増加が認められる。
- (2) 細径鋼繊維は一般的な繊維長の目安である粗骨材の最大寸法と同程度以下であっても、高い補強効果があることがわかった。また、アラミド繊維は鋼繊維と同程度の補強効果が期待できることもわかった。
- (3) 短繊維混入率とアスペクト比の積  $V_f \cdot L/D$ により、形状寸法の違いによらず、短繊維の補強効果を簡易的に評価できる可能性があることがわかった。

### 参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一，オーム社，1981
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9
- 3) 石井精一，西村一博，児山裕樹，一宮利通：超高強度繊維補強コンクリートの道路橋への適用事例，第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.13-16，2006.10
- 4) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：高強度コンクリートの力学特性に及ぼす各種短繊維の影響，第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.549-554，2012.10
- 5) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983.3
- 6) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2013.3
- 7) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典：PVA短繊維を用いた早強コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.250-255，2012.7
- 8) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：アラミド短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートに関する基礎的研究，繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム論文集，pp.319-324，2012.9
- 9) 谷口秀明：テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究，筑波大学学位論文，2007.3
- 10) 吉武勇，吉岡国和，蛭谷祐至，宮本圭介，浜田純夫：若材齢膨張コンクリートの引張強度におよぼす粗骨材量の効果，材料，Vol.56，No.3，pp.282-286，2007.3