

PC 部材に使用する早強コンクリートの力学特性に与える 各種短繊維の影響

Influence of Various Short Fibers on Mechanical Properties of Early-Strength Concrete for PC Members

佐々木 亘 WATARU SASAKI
谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

PC 上部工で用いられる設計基準強度 40N/mm^2 程度の早強コンクリートに鋼繊維、PVA 繊維およびアラミド繊維といった各種短繊維を混入し、力学特性に与える影響について検討を行った。その結果、①圧縮強度、静弾性係数およびひび割れ発生強度に与える短繊維の影響は小さいこと、②細径鋼繊維はその繊維長が粗骨材の最大寸法と同程度かそれ以下であっても、補強効果が大きいこと、③集束アラミド繊維は鋼繊維と同程度の補強効果を有すること、④短繊維の混入率とアスペクト比の積を用いることにより、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などが分かった。

キーワード：短繊維補強コンクリート、細径鋼繊維、集束アラミド繊維、曲げタフネス、せん断強度

This paper describes the experimental results of influence of various short fibers on mechanical properties of fiber reinforced early-strength concrete. Its design strength is about 40 N/mm^2 for PC superstructures, and the short fiber is steel, PVA or aramid fiber. As a result, the followings are obtained; 1) The influence of short fibers on compressive strength, Young's modulus or split cracking strength is small, 2) The length of the smaller 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) The test results suggest that the reinforcement effect of short fiber can be estimated by introducing the product of fiber content and aspect ratio.

Key Words: Fiber Reinforced Concrete, Small Diameter Steel Fiber, Strand Aramid Fiber, Flexural Toughness, Shear Strength

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、耐衝撃性などのさまざま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¹⁾。最近では、設計基準強度 180N/mm^2 という高い圧縮強度を持ち、鋼繊維を比較的多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)²⁾が実用化され、道路橋等への適用³⁾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⁴⁾。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^2 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

(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

表-1 使用した短繊維

記号	種類	繊維径 <i>d</i> (mm)	繊維長 <i>l</i> (mm)	アスペクト 比 <i>l/d</i>	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
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。

トンネル覆工など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⁵⁾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1.5倍以上とするのが一般的⁶⁾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) コンクリートの配合

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上部構造物に使用される設計基準強度40N/mm²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普通コンクリートである配合Baseの単位水量(記号:W)は、

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 ² /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。

コンクリート標準示方書⁶⁾に示される標準範囲(155~175kg/m³)の中心値である165kg/m³とし、単位粗骨材絶対容積(記号:V_G)は0.370m³/m³とした。スランプは12±2cm程度である。

短繊維補強コンクリートとする場合には、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⁷⁾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/m³とし、短繊維混入率(容積百分率、記号:V_F)0.1%の増加に対してV_Gを0.007m³/m³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

表-3 コンクリートの配合

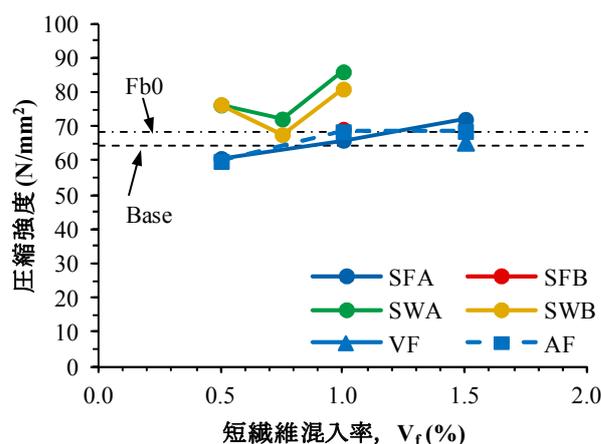
記号	W/C (%)	W (kg/m ³)	V _G (m ³ /m ³)	SP (C×%)	短繊維の種類	V _f (%)	
Base	40	165	0.370	0.7	-	0	
Fb0			0.260	1.5	-	0	
SFA0.5		175	0.200	0.335	0.7	SFA	0.50
SFA1.0				0.300	0.9		1.00
SFA1.5				0.260	1.5		1.50
SFB1.0				0.300	0.9	SFB	1.00
SWA0.5				1.5	SWA	1.5	0.50
SWA0.75						1.7	0.75
SWA1.0						2.0	1.00
SWB0.5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

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_G の低減量を大きくし、細径鋼繊維では V_f によらず V_G=0.200m³/m³ 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⁸⁾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_G の低減量を大きくした。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。

(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)、せん断強度試験 (JSCE-G553) および切欠きはりの曲げ試験 (「切欠きはりを用いたコンクリ

図-1 V_fと圧縮強度の関係

ートの破壊エネルギー試験 (JCI-S-001-2003)」および「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法 (JCI-S-002-2003)」により行った。各試験は材齢 28 日で実施した。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)²⁾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

(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

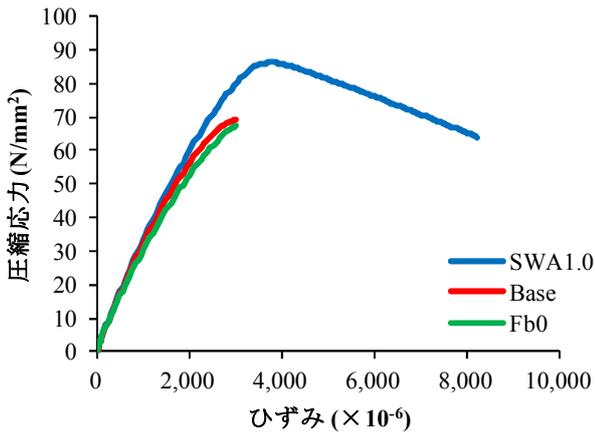


図-2 圧縮強度試験における応力-ひずみ曲線の一例

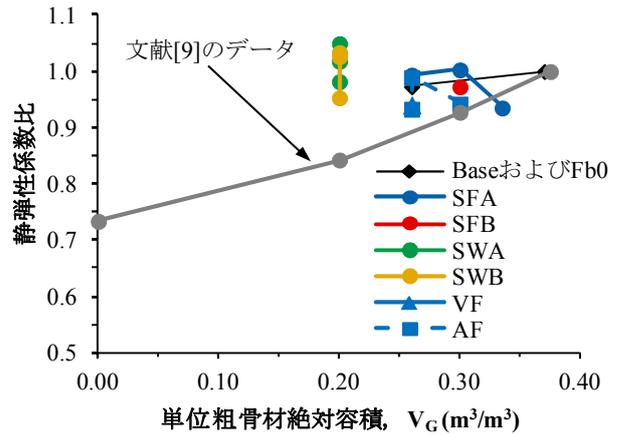


図-4 V_G と静弾性係数比の関係

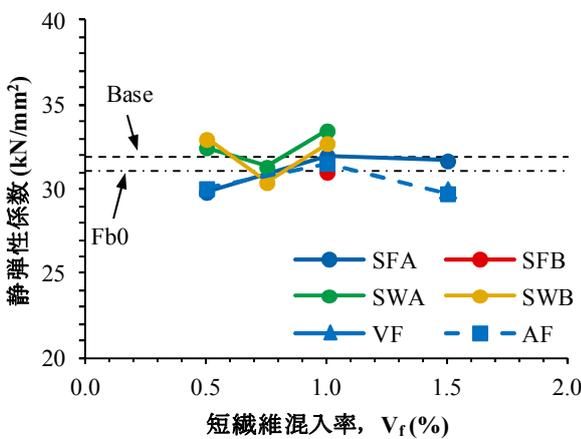


図-3 V_f と静弾性係数の関係

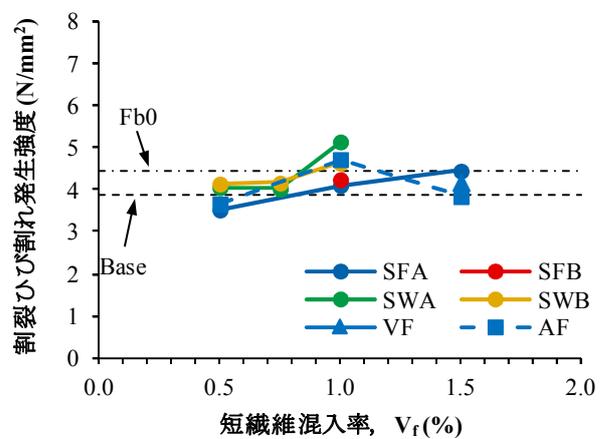


図-5 V_f と割裂ひび割れ発生強度の関係

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、高強度鋼繊維、PVA 繊維およびアラミド繊維については、短繊維の種類による圧縮強度の差異はみられず、 V_f の増加に従って圧縮強度も増加する傾向が見られる。しかし、Base に対して、 V_G を減じた Fb0 の圧縮強度も増加しており、その増加の程度は前述の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⁴⁾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。図-2 は圧縮強度試験で得られた応力-ひずみ曲線の一例である。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、その差異はより明確になっ

ていることが分かる。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。

(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 と静弾性係数の関係を調べた実験結果⁹⁾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分かる。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、高強度鋼繊維、PVA 繊維およびアラミド繊維については、ばらつきはあるものの V_G の減少に伴う静弾性係数の低下傾向が確認できるが、細径鋼繊維については、

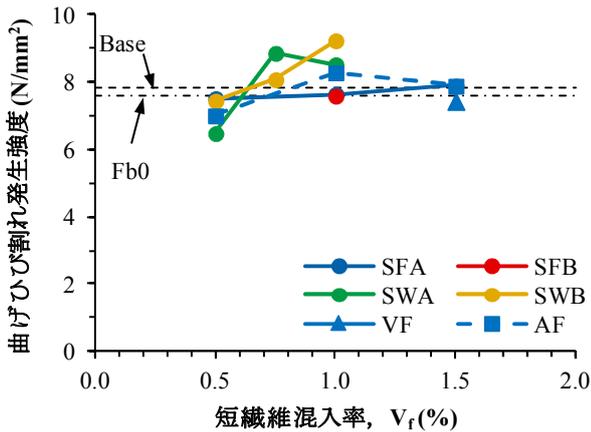


図-6 V_f と曲げひび割れ発生強度の関係

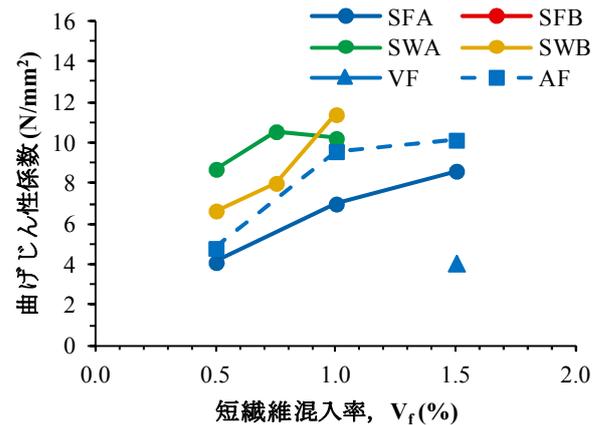


図-8 V_f と曲げじん性係数の関係

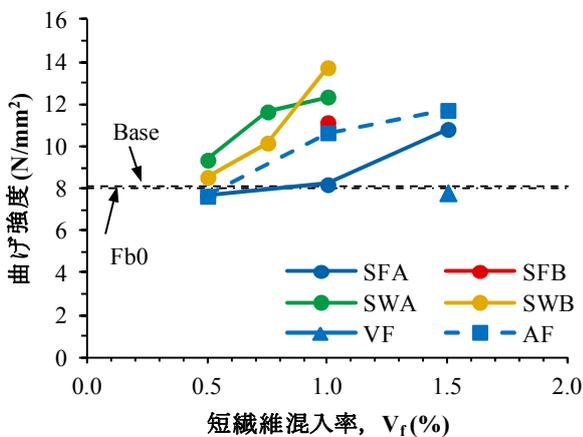


図-7 V_f と曲げ強度の関係

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) 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¹⁰⁾。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。

(4) 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、細径鋼繊維を除いて短繊維の混入および V_f との間にも明確な傾向は見られなかった。細径鋼繊維については、割裂ひび割れ発生強度の場合と同様に、 V_f の増加に伴って曲げひび割れ発生強度も増加する傾向がみられた。

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 の影響が明確にあらわれた。鋼繊維に着目すると、いずれも V_f の増加に伴って曲げ強度も増加しているが、普通鋼繊維では $V_f=1.0\%$ 以下では、曲げ強度の増加はわずかであり、Base および Fb0 と同程度である。

一方、細径鋼繊維は繊維長が短いにも関わらず、他の鋼繊維に比べ同じ V_f に対して高い曲げ強度が得られており、高い補強効果を有しているといえる。

合成繊維では、PVA 繊維は $V_f=1.5\%$ であっても Base と同程度の曲げ強度であったのに対し、アラミド繊維を用いると普通鋼繊維を上回る曲げ強度が得られた。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分かった。

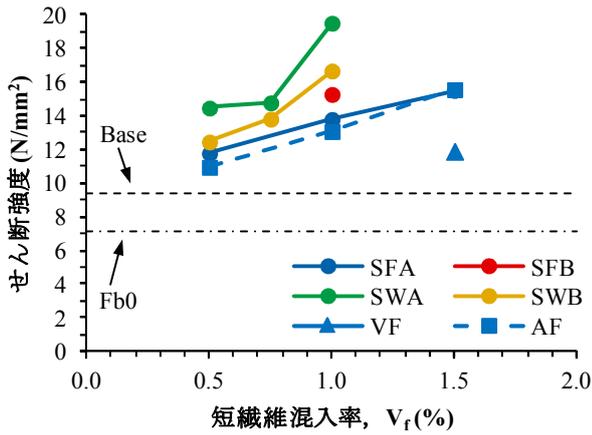


図-9 V_f とせん断強度の関係

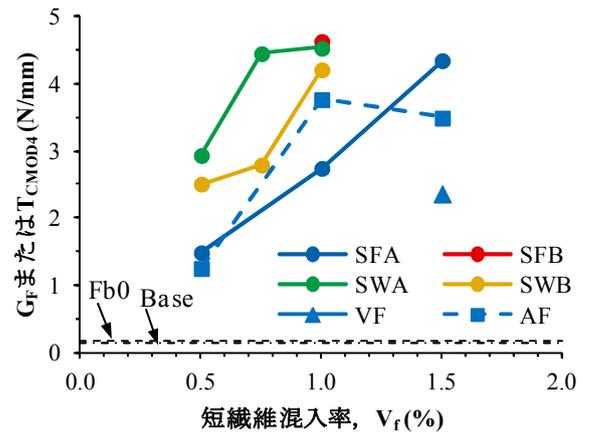


図-11 V_f と G_F または T_{CMOD4} の関係

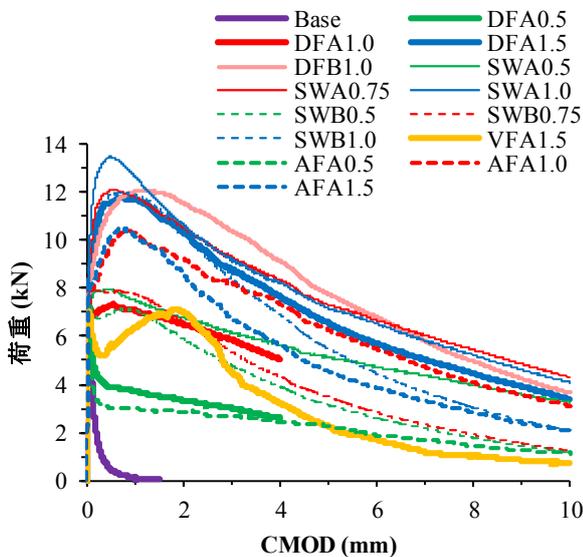


図-10 荷重-CMOD 曲線

V_f と曲げじん性係数の関係を図-8に示す。曲げじん性係数とは、曲げ強度試験で得られる荷重-たわみ曲線下の面積を基準に平均化した換算曲げ強度である。したがって、短繊維を用いないBaseやFb0では、所定のたわみまでの荷重-たわみ曲線を測定できないため、曲げじん性係数の算出もできない。図-8より、曲げ強度では変化の小さかった普通鋼繊維の $V_f=1.0\%$ 以下であっても、より明確に V_f の影響が確認できる。曲げじん性係数は短繊維を用いないコンクリートでは測定することが困難であるため、短繊維自体の混入による効果は評価できないが、短繊維の種類や混入率による相対的な評価には、曲げ強度よりも適していると言える。

(5) せん断強度

V_f とせん断強度の関係を図-9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_G 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_G が小さくなっているにもかか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分かる。鋼繊維に着目すると、任意の V_f では細径鋼繊維 > 高強度鋼繊維 > 普通鋼繊維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。アラミド繊維は普通鋼繊維と同程度であり、PVA繊維を $V_f=1.5\%$ 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、アラミド繊維や普通鋼繊維を $V_f=0.5\%$ とした場合と同程度のせん断強度であった。

(6) 切欠きはりの曲げ試験によるタフネスの評価

切欠きはりの曲げ試験によって得られた荷重-CMOD (ひび割れ肩口開口変位) 曲線を図-10に示す。この試験は一般に、ひび割れの開口にとまない消費されるエネルギー (破壊エネルギー) を測定するために行われる試験であり、本実験においても、短繊維を用いないBaseおよびFb0であっても、最大荷重以降の軟化域の荷重-CMOD曲線を測定することが可能であった。なお、図中にはFb0の荷重-CMOD曲線は示していないが、Baseに対して有意な差はみられなかった。

図-11に V_f と破壊エネルギー(G_F)または $CMOD=4mm$ までのタフネス (T_{CMOD4}) の関係を示す。BaseおよびFb0は G_F 、その他の短繊維補強コンクリートでは T_{CMOD4} を示した。 G_F は図-10に示した荷重-CMOD曲線において、供試体が破断するまでの曲線下の面積から求められるが、短繊維を用いた場合には、供試体の破断までの荷重-CMOD曲線を測定することが困難であるため、 $CMOD=4mm$ までの面積から G_F と同様に求めたものを T_{CMOD4} とした。

図-11に示すように、BaseおよびFb0の G_F は $0.15N/mm$ 程度であったのに対し、短繊維を混入した場合には、本実験において最も小さいものでも T_{CMOD4} は $1N/mm$ を上

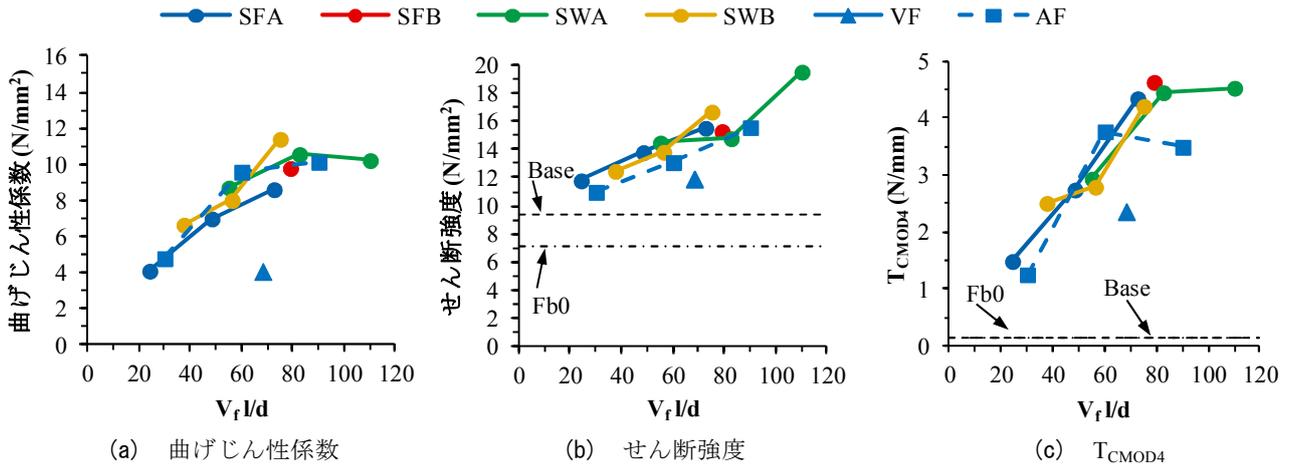


図-12 $V_f \cdot l/d$ と曲げじん性係数，せん断強度および T_{CMOD4} の関係

回り， V_f の増加とともに T_{CMOD4} も増加する。図-7 に示した曲げ強度ではBaseおよびFb0と同程度であった短繊維の種類および混入率でも，タフネスに着目すると相当に向上していることが，この図より明らかである。

また，図-8 に示した曲げじん性係数と比較すると，細径鋼繊維について，繊維長の影響が明確となり，繊維長が長いほうが T_{CMOD4} が大きい。ただし，SWA では $V_f=0.5\%$ から 0.75% の間で大きく増加し， 0.75% と 1.0% の間ではその増加はわずかであった。一方，SWB では $V_f=0.5\%$ から 0.75% の間より 0.75% と 1.0% の間での増加が大きい。この点に関しては次章で考察する。アラミド繊維は $V_f=1.0\%$ で頭打ちがみられ，PVA 繊維は曲げじん性係数ではアラミド繊維や普通鋼繊維の $V_f=0.5\%$ と同程度となるのに対し， T_{CMOD4} では普通鋼繊維の $V_f=1.0\%$ と同程度であった。

4. 短繊維の形状寸法を考慮した補強効果の評価

図-12 は，短繊維混入率とアスペクト比の積 $V_f \cdot l/d$ と曲げじん性係数，せん断強度および T_{CMOD4} の関係である。本実験の範囲内ではあるが，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じん性係数等もがほぼ一義的に決まるような関係があることが分かった。図-11 において，細径鋼繊維が繊維長によって T_{CMOD4} が顕著に増加する V_f が異なる現象がみられた。しかし，図-12 (c) によれば，SWA および SWB はいずれも， $V_f \cdot l/d$ が 60 から 80 の間で T_{CMOD4} が顕著に増加しており，同様の相関関係として表現されている。一方，合成繊維に関しては，アラミド繊維は鋼繊維と同程度の補強効果を有していること，PVA 繊維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などが

この図より読み取ることができる。

前述の通り，PVA 繊維のみ繊維の破断が確認されており，図-12 で認められる PVA 繊維と鋼繊維およびアラミド繊維の差異は，繊維の破断の有無が影響している可能性がある。繊維の破壊形態については，繊維長や繊維径のほか，マトリクスとの付着強度や繊維がマトリクスから引き抜かれる際の見かけの引張強度が影響すると考えられる。この点についてはより詳細な検討が必要であるが，本実験の範囲内における鋼繊維およびアラミド繊維の結果から，繊維が破断せず引き抜けた場合には，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，短繊維は引張応力方向の 1 方向に配向し，一様に分散しているものとする。このとき，繊維長 l ，繊維径 d ，短繊維に生じる引張応力度 σ ，短繊維のマトリクスに対する付着応力度 τ の間には次の関係が成立する¹⁾。

$$\frac{l}{d} = \frac{\sigma}{\tau} \quad (1)$$

ここで式(1)の両辺に V_f を乗じる。 V_f は短繊維の体積混入率であるが，今仮定している理想的な条件下では，任意の断面における短繊維の面積比率と等しい。したがって， σV_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。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分かる。

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分かった。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分かった。
- 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分かった。

謝辞：本研究の実施にあたり、京都大学大学院工学研究科宮川豊章教授にご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート—特性と応用—，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：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3
- 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