

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

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 mechanical properties of high strength fiber reinforced concrete, compressive strength of which is 180 N/mm² or under. Short fiber is steel, PVA or aramid fiber. As a result, followings were obtained; 1) As the aramid fiber content is increased, the compressive strength of the concrete declines a little. 2) As mixing the short fibers into high strength concrete, the cracking strength by the splitting tensile test tends to be increased, but the strength may decline depending on the kind of short fibers. 3) Aramid fiber is more effective in the flexural strength and toughness of the concrete than PVA fiber.

Keywords : Fiber Reinforced Concrete, High Strength Concrete, Aramid Fiber, Flexural 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¹⁾。最近では、設計基準強度 180N/mm² 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⁾ や、微細な有機繊維を混入することにより一軸直接引張応力下において微細で高密度な複数ひび割れを形成し、疑似ひずみ硬化特性を示す複数微細ひび割れ型セメント複合材料 (HPFRCC)³⁾ といった高性能なセメント系材料が開発され、道路橋等への適用^{4),5)} も始まっている。しかし、それらはいずれも粒径の小さい細骨材を使用したモルタルである。

コンクリートはモルタルに比べて、収縮やクリープが小さく寸法安定性に優れることや、セメント量を少なくできるため、水和発熱が低減できるといった特長がある。また、現状では、UFC のように設計基準強度 180N/mm² までの高強度を必要とする構造物は少ない。このため、通常のコンクリートから UFC で対象とする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技術が確立すれば、様々な用途に広く展開できるものと考えられる。しかし、現状では、短繊維補強コンクリートの設計施工に関する指針類^{6),7)} は、水セメント比が 50%程度 of コンクリートを対象としたものであり、前述のような高い強度域を対象とした短繊維補強コンクリートの検討は必ずしも十分とは言えない。

そこで、本稿では、圧縮強度が実強度で 160~180N/mm² 程度の高強度コンクリートを対象として、鋼繊維、PVA 繊維およびアラミド繊維がコンクリートの力学特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で検討を行った短繊維を表-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⁶⁾ およびマニュアル⁷⁾ 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、極細鋼繊維は、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り、繊維長が 15mm と短い、繊維径が非常に小さいためアスペクト比は大きくなってい

る。

鋼繊維以外の有機繊維として、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いずれも、繊維径 0.0012mm 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、所定の繊維径の短繊維としたものである。

表-2 に短繊維以外の使用材料を示す。結合材は、既往の研究⁸⁾を参考に、低熱ポルトランドセメントの 10%をシリカフェュームで置換したものを用いた。

2.2 コンクリートの条件

コンクリートの条件を表-3 に示す。コンクリートの単位粗骨材絶対容積は、筆者らの行った PVA 繊維を用いた水セメント比 50~33%の短繊維補強コンクリートの検討⁹⁾を参考に、本実験での W/B も考慮し 0.200m³/m³とした。また、一部の条件では粗骨材を混入し

ないモルタルとした場合の力学特性についても確認を行った。水結合材比(W/B)は 16%を標準とし、一部の条件においては 19%についても確認を行った。単位水量はコンクリートの場合はコンクリート標準示方書¹⁰⁾に示される通常のコンクリートにおける標準値の上限 175kg/m³とし、モルタルでは 200kg/m³とした。空気量の設計値は 2.0%とし、フレッシュ時の流動性状としては、スランプフロー600mm 以上を目標とした。

表-1 にコンクリートに対して検討した短繊維混入率を示した。フレッシュ性状への影響を考慮し、繊維径が小さくアスペクト比が大きいものほど混入率を小さくした。アラミド繊維については、3 水準の混入率を設定し、混入率の影響について確認した。なお、短繊維混入率は内割りによる体積割合とした。

2.3 実験方法

公称容量 100L の強制 2 軸ミキサによりコンクリートの練混ぜを行い、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の製作を行った。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)に準じて行い、割裂引張強度試験につい

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 ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	短繊維混入率 (%)
SF1	普通鋼繊維	0.62	30	48	1100	200	1.5
SF2	高強度鋼繊維	0.38	30	79	2610~3190	200	1.0
SF3	極細鋼繊維	0.2	15	75	2000 以上	200	0.75
VF1	PVA 繊維	0.66	30	45	900	23	1.5
VF2		0.2	18	90	975	27	1.0
AF1	アラミド繊維	0.5	30	60	3410	74	0.5, 1.0, 1.5
AF2		0.4	15	38			0.5, 1.0, 1.5
AF3		0.2	15	75			0.5, 0.75, 1.0

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 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
結合材	セメント	低熱ポルトランドセメント, 比表面積 3860cm ² /g	3.24	C
	混和材	エジプト産シリカフェューム, BET 比表面積 16.2m ² /g	2.25	SF
細骨材	砕砂	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 1.68%	2.61	S
粗骨材	碎石 2005	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 0.72%	2.65	G
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	-	SP
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	-	Ad

注) 骨材の密度は表乾密度である。

表-3 コンクリートの条件

水結合材比, W/B (%)	16, 19
単位粗骨材絶対容積 V_G (m ³ /m ³)	0.200, 0
空気量 (%)	2.0
スランプフローの目標値	600mm 以上

では、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

3.1 圧縮強度

図-1に短繊維の種類および混入率と圧縮強度の関係を、図-2に短繊維の種類および混入率と圧縮強度比の関係を示す。ここで、圧縮強度比とは、各短繊維を混入させたコンクリートの圧縮強度を、短繊維を混入しないコンクリートの圧縮強度で除した値である。

図-1より、材齢91日の圧縮強度は短繊維の種類によって160~180N/mm²の範囲を有することがわかる。図-2より、いずれの短繊維を用いた場合も、材齢7日および28日の圧縮強度比は0.8~0.9程度である。材齢91日では、鋼繊維の場合はほぼ1.0となり、短繊維を用いない場合と同程度まで圧縮強度が発現するが、有機繊維を用いた場合は、アラミド繊維(AF1, AF2)および細径のPVA繊維(VF2)などで圧縮強度比が0.9程度にとどまるものが多くみられた。

また、アラミド繊維では混入率が大きくなるにしたがって圧縮強度が小さくなる傾向にある。特に、繊維径0.5mmのもの(AF1)でその傾向が顕著である。これは、樹脂によるアラミド繊維の集束が、コンクリートマトリクスより弱いため、圧縮応力下で短繊維が弱点になっていることが考えられる。本実験の範囲では、径が大きくなるほど圧縮強度に及ぼす影響が大きい。

3.2 静弾性係数

図-3に短繊維の種類および混入率と静弾性係数比の関係を示す。ここで静弾性係数比とは各短繊維を混入させたコンクリートの静弾性係数を、短繊維を混入しないコンクリートの静弾性係数で除した値である。

水セメント比50~33%の検討⁹⁾では短繊維混入率の増加に伴った単位粗骨材絶対容積の減少により、静弾性係数が低下する傾向が得られているが、本実験においては、アラミド繊維に着目すれば短繊維混入率の増加に伴い静弾性係数が低下する傾向もみられるが、全体としては静弾性係数の低下はそれほど大きくない。これは、水結合材比を減じ高強度化することにより、骨材や短繊維がコンクリートの静弾性係数へ及ぼす影響が小さくなっているものと考えられる。

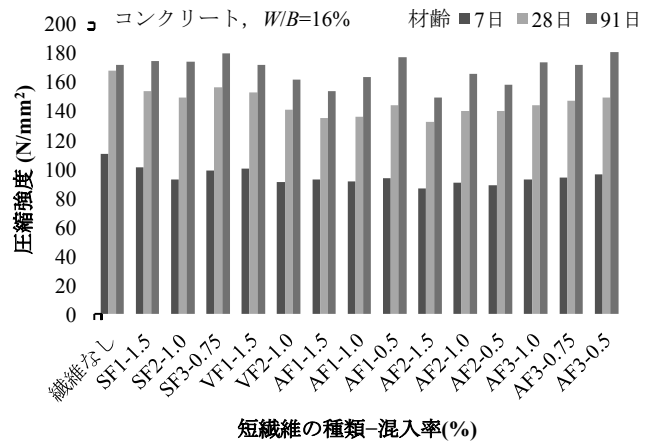


図-1 短繊維の種類および混入率と圧縮強度の関係

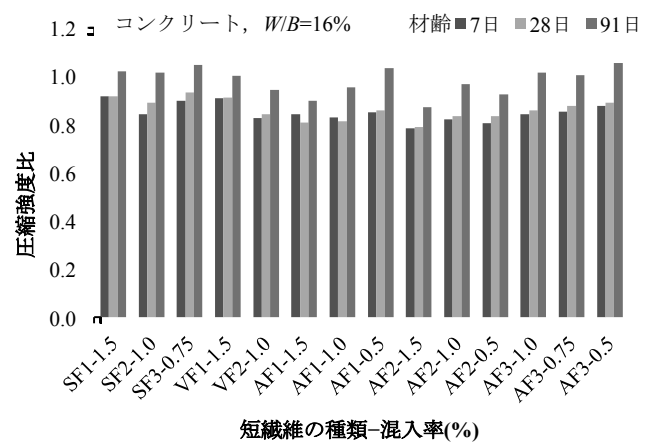


図-2 短繊維の種類および混入率と圧縮強度比の関係

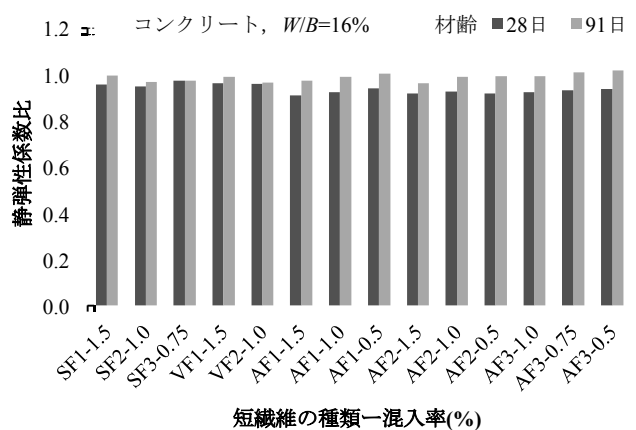


図-3 短繊維の種類および混入率と静弾性係数の関係

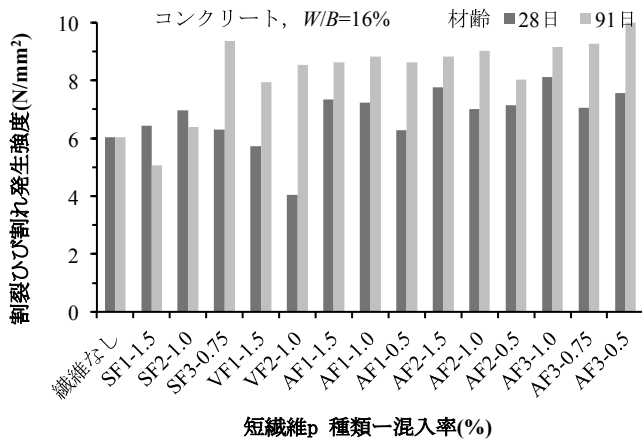


図-4 短繊維の種類および混入率と割裂ひび割れ発生強度の関係

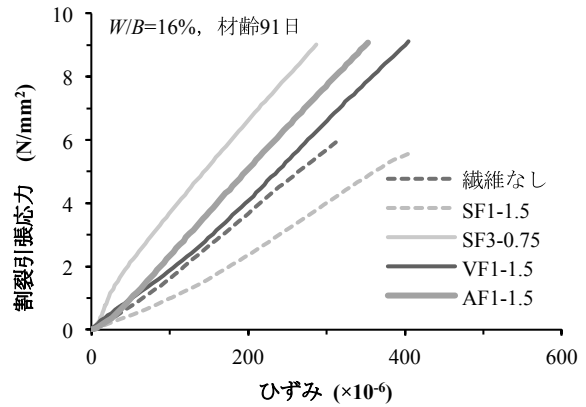


図-5 割裂引張試験における応力-ひずみ関係の一例

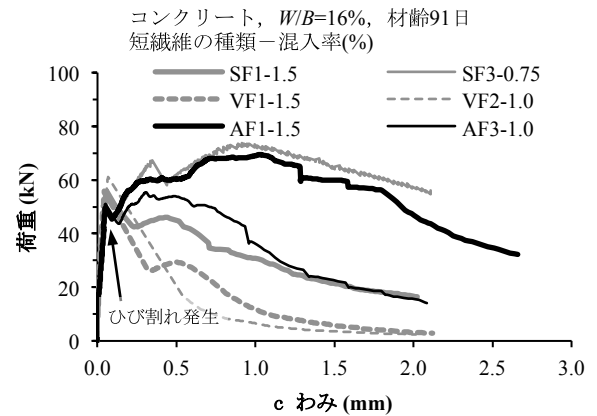
3.3 割裂ひび割れ発生強度

図-4に短繊維の種類および混入率と割裂ひび割れ発生強度の関係を示す。材齢(日のPVA繊維, 材齢91日の普通鋼繊維(SF1)および高強度鋼繊維(SF2)などをのぞけば, 短繊維を混入することで割裂ひび割れ発生強度が増加している。図-5に割裂引張強度試験において, 供試体端面に張り付けたひずみゲージにより測定した応力-ひずみ関係の一例を示す。応力-ひずみ関係の傾きに注目すると, 短繊維の混入によって割裂引張試験時の剛性が変化していることが確認できる。I応力-ひずみ関係の傾きは, PVA繊維(VF1)を用いた場合は短繊維を混入しないものと同程度であるのに対し, アラミド繊維(AF1)を用いた場合は若干大きくなっている。PVA繊維の弾性係数はコンクリートよりも小さいのに対し, アラミド繊維の弾性係数はコンクリートよりも大きい。一方, 鋼繊維の場合は, 高強度鋼繊維を用いた場合は傾きが大きくなっているのに対し, 普通鋼繊維では傾きは小さくなっている。繊維自体の弾性係数は同様であるにもかかわらず, このような現象を生じたのは, 短繊維両端のフック加工によって, SF3とは付着特性が異なっている可能性が考えられる。この点に関しては, 今後, より詳細な検討が必要であると考えられる。

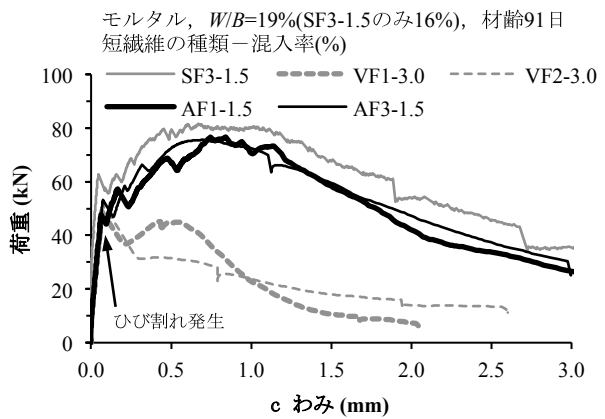
3.4 曲げ強度および曲げタフネス

(1) 荷重-たわみ曲線

図-6に曲げ試験における荷重-たわみ曲線の一例を示す。図-6(a)はコンクリートであり, 短繊維の形状寸法(繊維径および繊維長)に近いものは同程度の混入率のものを示した。図-6(b)は粗骨材を用いないモルタルとし, フレッシュ時に材料分離やファイバーボールを生じない範囲で短繊維混入率を高めたもの



(a) コンクリート



(b) モルタル

図-6 曲げ試験における荷重-たわみ曲線

である。これによると、普通鋼繊維(SF1)およびPVA 繊維(VF1, VF2)を用いた場合は、曲げひび割れの発生以降ならかに荷重が低下している。特にPVA 繊維では、モルタルとして短繊維混入率を3.0%まで高めた場合でも、ひび割れ発生後に大きな荷重回復はみられない。本実験ではマトリクスの強度域が非常に高く、曲げひび割れの発生強度も高くなっていることから、これらの繊維ではひび割れ発生以降に繊維によって高い曲げ応力を負担できなかったものと考えられるI

極細鋼繊維(SF3)は、UFC で用いられる繊維であり、本実験においても曲げひび割れ発生後に繊維の架橋効果により荷重が増加する、いわゆるたわみ硬化特性³⁾を示している。一般的に、繊維補強コンクリートに用いる短繊維の繊維長は、粗骨材の最大寸法の1.5倍以上を標準¹⁰⁾とされるが、極細鋼繊維(SF3)の繊維長は粗骨材の最大寸法20mmに対して15mmと短いにも関わらず、図-6(a)に示すように高い補強効果が現れている。これは、前述の静弾性係数の場合と同様に、ペーストの高強度化により骨材の影響が小さくなっているものと推察される。これに対し、図-6(a)p AF1-1.5, 図-6(b)p AF1-1.5, 03)-1.5では極細鋼繊維と同程度の挙動を示している。図-6(a)p 03)-1.0は保持している荷重が他に比べ小さいが、普通鋼繊維(SF1)と同等以上の補強効果が確認できる。これより、高強度コンクリートに対しては、アラミド繊維を用いる事で鋼繊維を用いた場合と同程度の補強効果が期待できる事がわかった。

(2) 曲げひび割れ発生強度, 曲げ強度および曲げじん性係数

図-7および図-8は、それぞれ、短繊維混入率と曲げ強度比, 短繊維混入率と曲げひび割れ発生強度比の関係を示したものである。曲げひび割れ発生強度比および曲げ強度比とは、各短繊維を混入させたコンクリートの曲げひび割れ発生強度および曲げ強度を、短繊維を混入しないコンクリートの各値で除した値である。また、曲げひび割れ発生強度は、供試体に貼り付けたひずみゲージの変化から判断した。曲げ強度は、図-6に示すように曲げひび割れ発生後にたわみの増加とともに荷重が増加した場合であっても、その最大荷重から全断面有効として求めたものである。

図-7に示すように、曲げひび割れ発生強度比は短繊維の種類や混入率による特定の傾向はみられず、おおむね1.1~1.2程度であり、短繊維の混入により曲げひび割れ発生強度は若干増加している。ここでは、割裂ひび割れ発生強度にみられたような強度低下するものは確認されなかった。一方、曲げ強度は、

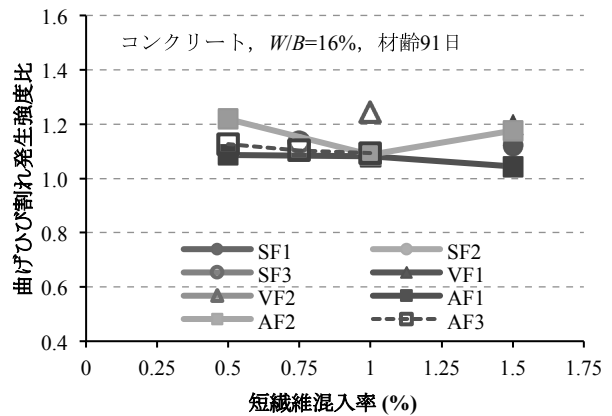


図-7 短繊維混入率と曲げひび割れ発生強度比の関係

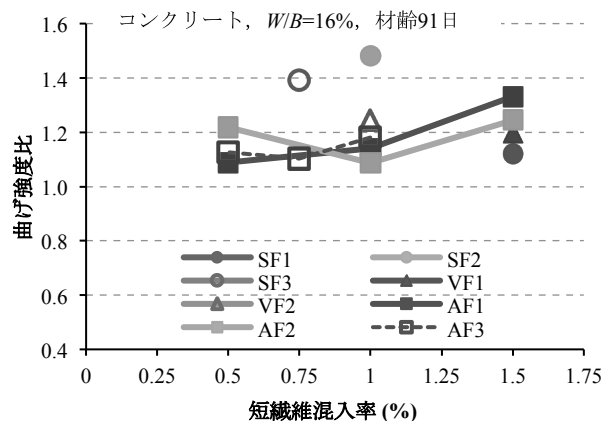


図-8 短繊維混入率と曲げ強度比の関係

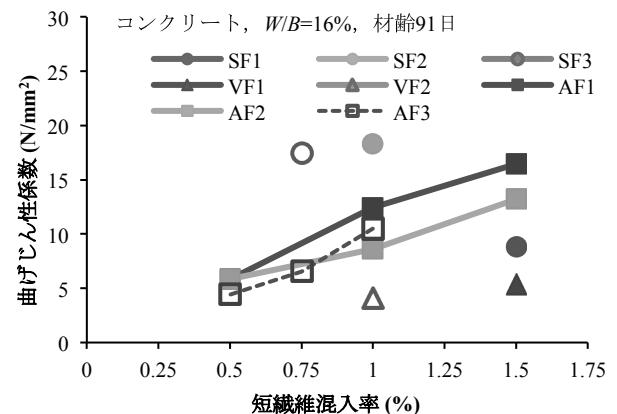


図-9 短繊維混入率と曲げじん性係数の関係

図-6からもわかるように短繊維による補強効果が小さい場合は曲げひび割れ発生強度と同値となる。したがって、アラミド繊維の短繊維混入率が小さい範囲やPVA繊維などでは図-8と図-7は同様となるが、高強度鋼繊維(SF2)や極細鋼繊維(SF3)ではひび割れ発生後の荷重増加により曲げ強度比が1.4以上となった。アラミド繊維においては短繊維混入率の小さい範囲では曲げ強度比の増加は小さいが、0.75~1.0%より混入率を高めることで、曲げ強度比を大きくする事が可能である事がわかる。アラミド繊維同士の比較では、AF2の曲げ強度比がやや小さく、AF3もしくは極細鋼繊維(SF3)のように繊維長が粗骨材の最大寸法よりも小さくても、アスペクト比の大きい短繊維は補強効果があることがわかった。

図-9は短繊維混入率と曲げじん性係数の関係を示したものである。高強度鋼繊維(SF2)や極細鋼繊維(SF3)が大きな値を示しているが、アラミド繊維も短繊維混入率を増加させることで、同程度まで曲げじん性係数を大きくする事が可能である事がわかる。アラミド繊維を用いたコンクリートの曲げじん性係数は、同じ短繊維混入率のPVA繊維と比較しても相当に大きく、短繊維混入率によっては、鋼繊維と同程度の補強効果を実現できる可能性のあることがわかった。

4. まとめ

本実験では、圧縮強度が実強度で160~180N/mm²程度の高強度コンクリートに種々の短繊維を混入し、その力学特性を調べた。その結果、以下の事が明らかとなった。

- (1) 鋼繊維を混入させた場合、圧縮強度の低下は見られなかったが、集束タイプのアラミド繊維を混入させた場合、混入率の増加に伴い、1割程度の圧縮強度の低下がみられた。
- (2) 短繊維の混入とそれに伴う単位粗骨材絶対容積の低減による静弾性係数への影響は小さい。
- (3) 割裂ひび割れ発生強度は短繊維の混入によりおおむね増加する傾向にあったが、普通鋼繊維(SF1)および高強度鋼繊維(SF2)を用いた場合には低下する現象が確認された。
- (4) 鋼繊維やアラミド繊維を高強度繊維補強コンクリートに用いる場合、その繊維長が粗骨材の最大寸法未満であっても、アスペクト比の大きい短繊維は補強効果を有する。
- (5) アラミド繊維の混入率を増加させると、曲げ強度および曲げじん性係数は大きくなった。同程度の形状寸法のPVA繊維に比べその補強効果は大きく、混入率によっては、鋼繊維を用いた場合と同程度の補強効果を実現できる可能性がある。

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) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），2007.3
- 4) 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
- 5) 佐々木亘，尾原文宏，吉浦伸明，大城壮司，本山政司：低弾性高じん性セメント系複合体を用いたPC桁連結床版の施工，土木学会第65回年次学術講演概要集，pp.911-922，2010.9
- 6) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983.3
- 7) 鋼材倶楽部：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル（トンネル編），1995.8
- 8) 河上浩司，西本好克：Fc100N/mm²級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp369-374，2002
- 9) 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.1，2012.7
- 10) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3