

アラミド短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートの基礎物性

Fundamental Properties of Aramid Fiber Reinforced High Strength Concrete

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

アラミド短繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートの基礎的データを得ることを目的として、その力学特性および収縮特性について確認を行った。その結果、1) 高強度コンクリートに集束タイプのアラミド短繊維を混入することにより圧縮強度はやや低下すること、2) 割裂引張強度試験によるひび割れ発生強度は大きくなること、3) 混入率によっては鋼繊維と同等程度の曲げじん性が得られること、4) アラミド短繊維を用いることで自己収縮ひずみを低減することが可能であることなどがわかった。

キーワード：短繊維補強コンクリート、高強度コンクリート、アラミド繊維、ひび割れ発生強度、自己収縮

This paper describes the examination results of mechanical and shrinkage properties of high strength concrete reinforced by resin bound short aramid fibers. As a result, the followings were obtained; 1) Increasing the aramid fiber content reduce compressive strength of concrete a little, 2) Mixing the aramid fibers into high strength concrete increases cracking strength by cleavage test, 3) The aramid fibers show the same reinforcement effect on the flexural toughness as steel fibers have, 4) Mixing the aramid fibers into high strength concrete can reduce autogenous shrinkage strain.

Key Words: Fiber Reinforced Concrete, High Strength Concrete, Aramid Fiber, First Crack Strength, Autogenous Shrinkage

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)²⁾や、極細径の有機繊維を混入し、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する、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、セメント量が少なくできるため、水和発熱を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%程度の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の短繊維補強コンクリートを対象とした検討は必ずしも十分とはいえない。

また、一般に UFC に用いられる短繊維は鋼繊維である。UFC は組織の緻密さから、鋼繊維の腐食による力学特性の低下については起こらないものとされているが、ごく表面に存在する鋼繊維の腐食により美観が損なわれる可能性については検討する必要がある²⁾。UFC より低い強度域の場合については、当然、鋼繊維の腐食による力学特性の低下について検討が必要であろう。これに対し、有機繊維を適用が可能であれば、より高耐久なコンクリートが実現できるものと考えられる。

表-1 使用した短繊維と短繊維混入率

記号	種類	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	短繊維混入率 (vol%)
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

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	<i>W</i>
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	<i>C</i>
	混和材	エジプト産シリカフェーム, BET比表面積 16.2m ² /g	2.25	
細骨材	砕砂	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 1.68%	2.61	<i>S</i>
粗骨材	砕石 2005	茨城県岩瀬産硬質砂岩, 吸水率 0.72%	2.65	<i>G</i>
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	—	<i>SP</i>
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	—	<i>Ad</i>

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, <i>W/B</i> (%)	16.0
単位水量, <i>W</i> (kg/m ³)	175
単位粗骨材絶対容積, <i>V_G</i> (m ³ /m ³)	0.300(繊維なし), 0.200
空気量 (%)	2.0
スランプフローの目標値	600mm 以上



写真-1 アラミド短繊維

そこで、本稿では、高強度域に対応しうる有機繊維としてアラミド繊維に着目し、圧縮強度が 180N/mm²未満の高強度繊維補強コンクリートを対象として、アラミド短繊維がコンクリートの力学特性や収縮特性に及ぼす影響について検討を行った。

2. アラミド短繊維が高強度コンクリートの力学特性に及ぼす影響

(1) 実験概要

a) 使用材料

本実験で検討を行った短繊維を表-1に示す。用いたアラミド短繊維はいずれも、繊維径 0.012mm のパラ型アラミド繊維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。アラミド短繊維の外観を写真-1に示す。比較用の短繊維としては、鋼繊維および PVA (ポリビニルアルコール, 通称ビニロン) 短繊維を用いた。鋼繊維のうち、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

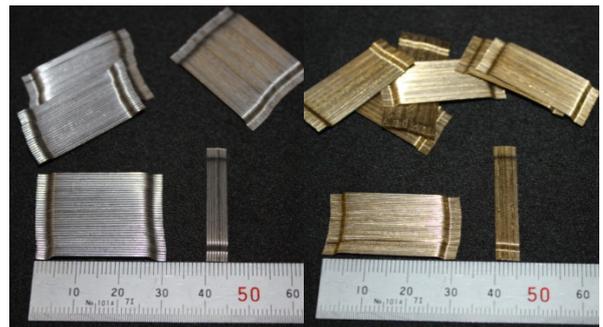


写真-2 普通鋼繊維(左)および高強度鋼繊維(右)

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。写真-2に普通鋼繊維および高強度鋼繊維の外観を示す。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

繊維径が小さいためアスペクト比は大きくなっている。PVA 短繊維は、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り、これまでも PVA 短繊維を混入した繊維補強コンクリートの検討⁸⁾を行っている。

表-2 に短繊維以外の使用材料を示す。結合材は、高強度コンクリートに関する既往の研究⁹⁾を参考に、低熱ポルトランドセメントの10%をシリカフェームで置換したものをを用いた。

b) 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、短繊維を用いないコンクリートでは $0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ とし、短繊維を用いる場合には、筆者らの行った PVA 短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、本実験での水結合材比(W/B)も考慮し $0.200\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。W/B は 16% とし、単位水量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 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 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 には各短繊維で検討した短繊維混入率も併記している。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。

c) 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円柱供試体(φ100×200mm)および角柱供試体(100×100×400mm)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おいては、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点をひび割れ発生強度とした。

(2) 実験結果および考察

a) 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 $160\sim 180\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲を有することがわかる。図-2 によれば、いずれの短繊維を混入させた場合も、材齢 7

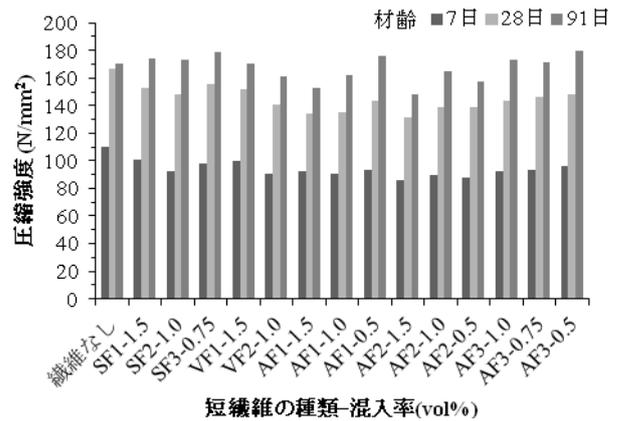


図-1 短繊維の種類および混入率と圧縮強度の関係

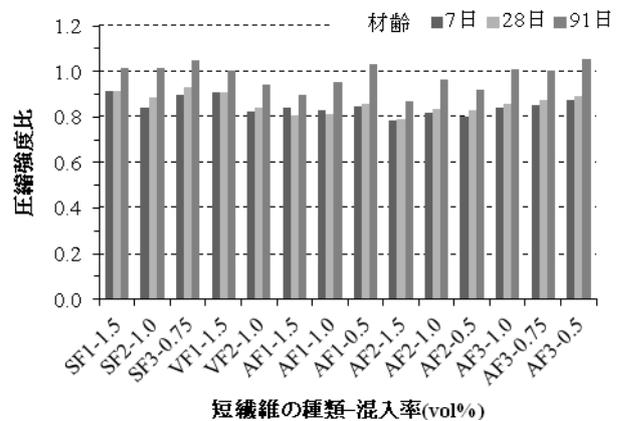


図-2 短繊維の種類および混入率と圧縮強度比の関係

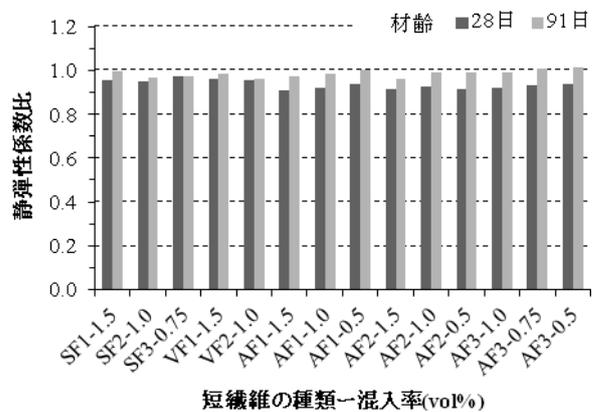


図-3 短繊維の種類および混入率と静弾性係数比の関係

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、アラミド短繊維(AF1,AF2)および細径の PVA 短繊維(VF2)などで圧縮強度比が 0.9 程度にとどまる結果となった。

また、アラミド短繊維では混入率が大きくなるにした

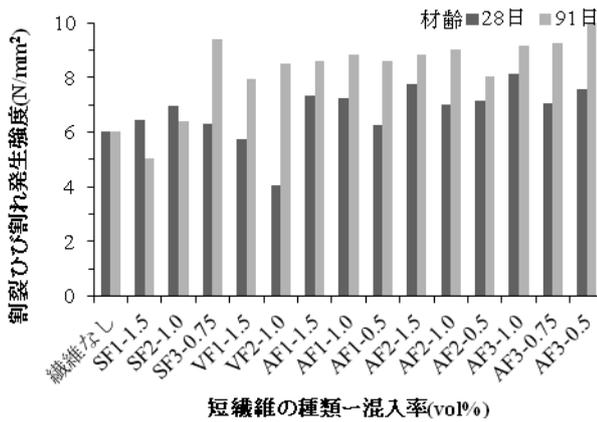


図-4 短繊維の種類および混入率と割裂ひび割れ発生強度の関係

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)ではその傾向が顕著である。これらの結果から判断すると、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ことが明らかになった。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く、圧縮応力下ではアラミド短繊維が弱点になっていると推察される。

b) 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、アラミド短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。

c) 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 28 日の PVA 短繊維，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。そのなかでも、アラミド短繊維を用いた場合、鋼繊維や PVA 短繊維と比較して材齢 28 日，91 日ともにひび割れ発生強度が高くなるのがわかる。また、短繊維を用いない場合、材齢の経過に対してひび割れ発生強度の増進はみられないが、短繊維を用いた場合、本実験で用いたほとんどの繊維では、材齢の経過とともに

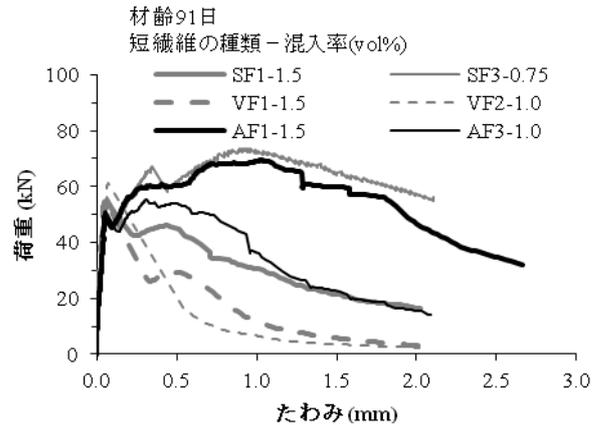


図-5 曲げ試験における荷重-たわみ曲線の一例

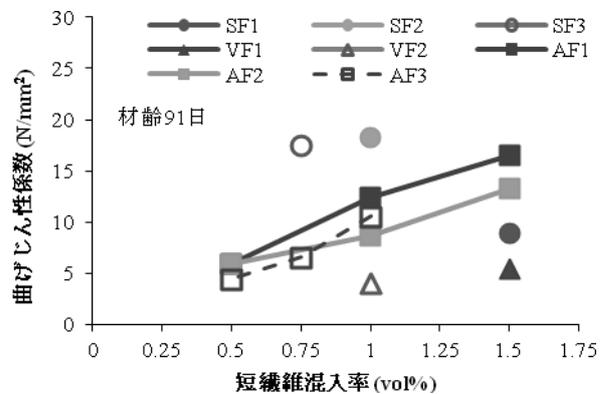


図-6 短繊維混入率と曲げじん性係数の関係

にひび割れ発生強度も大きくなっている。これは、材齢に伴って短繊維とマトリクスの付着強度が増進していることが可能性として考えられるが、普通鋼繊維(SF1)および高強度鋼繊維(SF2)では逆にひび割れ発生強度は低下している。これらの短繊維は両端にフック加工がされており、他の繊維と付着特性が異なっていることも考えられ、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る。

d) 曲げ強度および曲げタフネス

図-5 に曲げ試験における荷重-たわみ曲線の一例を示す。短繊維の形状寸法(繊維径および繊維長)が近いものは同程度の混入率で比較している。これによると、普通鋼繊維(SF1)および PVA 短繊維(VF1, VF2)を用いた場合、曲げひび割れの発生以降は曲げひび割れ発生荷重を上回るような荷重回復はみられず、たわみの増加に従って荷重が低下していく傾向にある。特に PVA 短繊維では荷重の低下が大きいことがわかる。コンクリート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ため、ひび割れ発生以降に短繊維によって高い曲げ

応力を負担できなかつたものと考えられる。

極細鋼繊維(SF3)は、UFC で用いられる短繊維であり、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 倍以上が標準¹⁰⁾とされているが、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-5 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。アラミド短繊維を用いた場合は、AF1-1.5 では極細鋼繊維と同程度の挙動を示している。AF3-1.0 は、AF1-1.5 と比較すると小さいものの、普通鋼繊維(SF1)に対しては同等以上の荷重を保持していることが確認できる。

図-6 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。曲げじん性係数とは、図-5 に示す荷重-たわみ曲線において、曲線と横軸(2mm まで)によって囲まれた面積によって表わされる指標である。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、アラミド短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できることがわかる。アラミド短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 2~3 倍程度大きい。

以上より、高強度コンクリートに対してアラミド繊維を用いることで、短繊維混入率によっては、鋼繊維と同程度の補強効果を期待できることがわかる。

3. アラミド短繊維が高強度コンクリートの収縮特性に及ぼす影響

(1) 実験概要

低水結合材比となる高強度コンクリートでは、乾燥収縮だけでなく自己収縮も問題となる。そこで本章では、アラミド短繊維を用いた高強度コンクリートの自己収縮および乾燥収縮について検討を行った。

使用材料やコンクリートの配合は、基本的には前章と同様であるが、短繊維については繊維径 0.5mm、繊維長 30mm のアラミド繊維 (表-1 の AF1、以後図中では AF と表記) と、繊維径 0.66mm、繊維長 30mm の PVA 繊維 (表-1 の VF1、以後図中では VF と表記) とで比較を行うこととした。また、収縮対策として、膨張材 (エトリンサイト系) および収縮低減剤 (低級アルコール系) を併せて用いた場合の効果についても確認を行った。

自己収縮ひずみの測定は、「(仮称) 高流動コンクリー

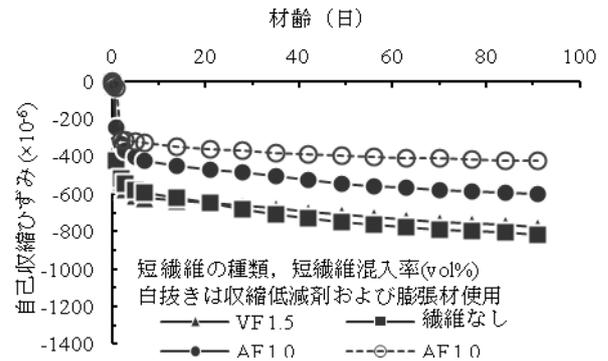


図-7 自己収縮ひずみの経時変化

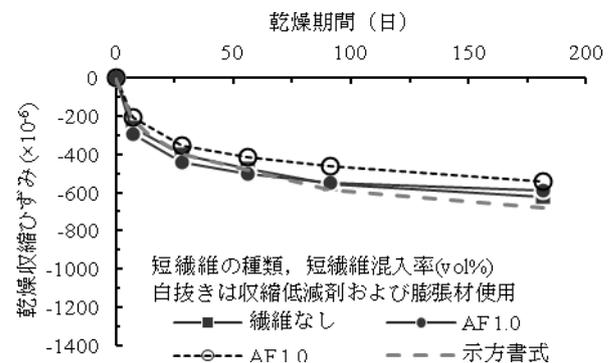


図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化

ト自己収縮試験方法¹¹⁾に準じた。100×100×400mm の角柱供試体中央に埋込み型のひずみ計を設置し、封かん状態におけるひずみを連続的に計測した。乾燥収縮ひずみは JIS A1129-2 (コンタクトゲージ法) によるもので、ゲージプラグは埋込み型のものを用いた。供試体は 100×100×400mm の角柱供試体であり、材齢 7 日まで標準水中養生を行い、基長の測定後、温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内に存置した。

(2) 実験結果および考察

a) 自己収縮ひずみ

図-7 に自己収縮試験の結果を示す。図では収縮ひずみを負の値で示しているが、文章中では収縮を正として述べる。短繊維を用いないコンクリートでは、低熱ポルトランドセメントを用いているものの、低水結合材比であること、シリカフェームを用いていることにより、材齢 91 日で 800×10^{-6} 程度の自己収縮ひずみを生じる。PVA 繊維を用いた場合は短繊維を用いない場合と同程度の自己収縮ひずみを生じた。これは、フレッシュ時の流動性を確保しつつ PVA 繊維を混入させるために単位粗骨材絶対容積を減じているので、PVA 短繊維にも自己収縮ひずみを拘束する効果があることを示唆するものであると

考えられる。それに対して、アラミド短繊維を用いた場合の自己収縮ひずみは、材齢 91 日で 600×10^{-6} 程度であり、短繊維を用いないコンクリートや、PVA 短繊維を用いたコンクリートと比較して、自己収縮ひずみを大きく低減できることがわかる。PVA 短繊維は繊維の表面が平滑であるのに対し、アラミド短繊維は集束されており平滑ではない。このために、短繊維の表面積が大きくなり、短繊維による拘束効果が大きくなっているものと推察される。また、繊維の弾性係数の違いも影響を及ぼすものと考えられる。さらに、アラミド短繊維を混入した繊維補強コンクリートに収縮低減剤および膨張材を用いることで、材齢 91 日の自己収縮ひずみを 400×10^{-6} 程度まで抑えることができている。この値は、PC 上部工で用いられる高強度コンクリート（早強ポルトランドセメント使用、水セメント比 30%程度）と同程度の値である⁹⁾。

UFC では自己収縮ひずみが非常に大きく、部材内部に補強鉄筋を配置しないことを標準としている²⁾ように、高強度コンクリートでは自己収縮について留意が必要となることが多い。アラミド短繊維を用いることで高強度繊維補強コンクリートの自己収縮を低減できることは、適用に際しての大きな利点であると考えられる。

b) 乾燥収縮ひずみ

図-8 に乾燥収縮試験の結果を示す。コンクリート標準示方書に示される乾燥収縮¹⁰⁾の予測式に単位水量 175kg/m^3 を代入した曲線も併せて示した。これによると、短繊維を用いないコンクリートおよびアラミド短繊維を用いたコンクリートともに、示方書の予測式とほぼ同等の値であり、示方書の予測式により乾燥収縮ひずみが予測できる可能性が示された。また、乾燥収縮ひずみでは、自己収縮ひずみの場合に比べて、アラミド短繊維および膨張材・収縮低減剤の影響は小さいこともわかった。

4. まとめ

アラミド短繊維を混入した高強度繊維補強コンクリートについて、その力学特性および収縮特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- 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短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アラミド短繊維を用いることで割裂ひび割れ発生強度が増加する。

- ④アラミド繊維の混入率の増加に伴って曲げじん性係数は大きくなる。同程度の形状寸法、混入率の PVA 短繊維に比べその補強効果は大きく、混入率によっては、鋼繊維と同程度の補強効果を期待できる。
- ⑤同じ水結合材比のコンクリートに比べ、アラミド短繊維を用いたコンクリートは自己収縮ひずみが小さくなる。
- ⑥コンクリート標準示方書の乾燥収縮ひずみの予測式は、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを用いた高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみにも適用できる可能性がある。

謝辞：本研究の実施に当たり、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) 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) 谷口秀明，三上浩，浅井洋，樋口正典，藤田学：高じん性コンクリートの開発—ビニロン繊維補強コンクリートの基礎物性—，三井住友建設技術研究所報第 6 号，pp.73-82，2008.11
- 9) 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，pp.369-374，2002.7
- 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
- 11) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），1994.5