

論文 アラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートに関する研究

竹山 忠臣*1・小川 義宏*2・出井 丈也*3・内田 裕市*4

要旨：寸法・形状の異なるアラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートを製造し、フレッシュ性状ならびに硬化後の力学特性として、圧縮強度、切欠き梁の荷重-開口変位関係および引張軟化曲線について検討した。その結果、繊維径が細いとフレッシュ時の流動性が低下し繊維混入量を多くできないこと、繊維長を短くすると混入量を多くすることができ硬化後の力学特性も優れていることが示された。また、収束タイプの繊維は軟化特性の向上に有効であることが示された。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート, アラミド繊維, 曲げ強度, 引張軟化曲線, 圧縮強度

1. はじめに

近年、コンクリートに要求される性能は高度化、多様化しており、これに対応するためコンクリートの高性能化に関する研究が活発になっている。その一つとして、低水結合材比でありながら優れた流動性を持ち、圧縮強度 180MPa 以上の超高強度が得られる超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と略記）が実用化され、土木学会から超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）¹⁾が刊行されている。この指針で対象としている UFC は高い力学特性を得るために高強度の鋼繊維が用いられており、ひび割れが発生した場合に鋼繊維が腐食する可能性が考えられるため、使用時にはひび割れを許容しないこととされている。そこで、鋼繊維の代わりに耐食性に優れた有機繊維を用いることが検討されている。しかしながら、既往の研究によれば、有機繊維を用いた UFC は鋼繊維を用いた場合に比べ曲げ強度などの力学性能がかなり劣ることが報告されている²⁾。

そこで、本研究では、鋼繊維に代わる繊維として有機繊維の中でも特に高強度、高弾性率のアラミド繊維に着目して、アラミド繊維を用いた UFC に関して、その力学性能を検討することとした。

2. 実験概要

2.1 モルタルの配合および使用材料

本研究で用いたモルタルマトリクスの配合（結合材量

を 1.0 としたときの質量比）を表-1 に示す。この配合は既往の研究³⁾を参考にして定めたものである。結合材として低熱ポルトランドセメント（密度：3.21g/cm³）とシリカフューム（密度：2.2g/cm³）を用い、水結合材比（W/(C+SF)）を 0.19 とした（混和剤量の全量を水量として加算した）。微細組織の充填材として珪石粉末（密度：2.6g/cm³、比表面積 8180cm²/g）を用い、細骨材には 6 号珪砂（密度：2.6g/cm³）を使用した。また、混和剤としては、超高強度コンクリート用高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を使用した。なお、これらの材料は研究のために特別に開発されたものではなく、いずれも市販のものである。

2.2 繊維の種類と試験パラメータ

本研究では、繊維径、繊維長および形状の異なるアラミド繊維（写真-1）を用いることとし、比較のため鋼繊維も用いることとした。本研究で用いたアラミド繊維（コポリパラフェニレン・3,4'オキシジフェニレン・テラフタラミド）の材料特性は、密度 1.39 g/cm³、引張強度 3430 N/mm²、引張弾性率 72.5 kN/mm²である。表-2 に使用した繊維の一覧を示す。モノフィラメントタイプで繊維径が 12μm で繊維長 12mm としたものを 1 種類、繊維径が 45μm で繊維長を 3mm, 6mm, 8mm, 12mm に変化させたものをそれぞれ 1 種類、また繊維径 12μm の繊維 267 本をビニルエステル系樹脂により収束して外径 200μm、長さ 12mm のスティック状にしたものを 1 種類、

表-1 モルタルの配合

W/B	W	C	SF	SP	S	Ad
0.19	0.150	0.812	0.188	0.318	0.407	0.04

SF: シリカフューム, SP: 珪石粉末, S: 珪砂

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

*3 帝人テクノプロダクツ株式会社 高機能繊維技術開発部 アラミド商品開発課 界面技術開発グループ

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博 (正会員)

合計6種類のアラミド繊維について試験をおこなった。鋼繊維は、直径0.2mm、長さ15mm、引張強度2000N/mm²のものを用いた。

2.3 練り混ぜ

練り混ぜには、容量10lのホバートミキサーと容量10lのオムニミキサーを併用した。まず、モルタルの材料のうちセメントの1/2を残してホバートミキサーに投入、練混ぜを行い、材料が流動化した後に残りのセメントを投入してモルタルを練り上げた。その後、モルタルをホバートミキサーからオムニミキサーに移して、繊維を投入し練り混ぜた。

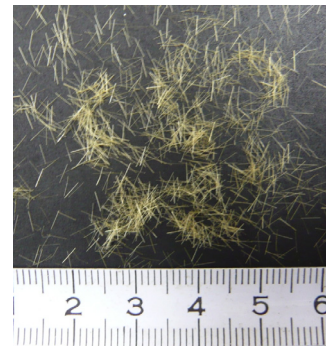
ホバートミキサーとオムニミキサーを併用した理由は、オムニミキサーでは粉体状態の材料に十分なせん断力を加えることができず、材料が流動化し難いためである。また、セメントを分割して投入した理由は、一括投入した場合に比べ材料を粉体状態から流動化させるまでの練混ぜ時間を短縮できるためである。さらに、繊維の練混ぜのためにオムニミキサーを用いたのは、粘性の高い材料の練混ぜにはホバートミキサーよりオムニミキサーの方が有効であり、特に繊維を均一に混ぜるのに有効であるためである。

2.4 供試体の打設

本研究で使用した供試体は、圧縮供試体はφ50×100mmの円柱供試体、曲げ供試体は40×40×160mmの角柱供試体である。コンクリートを型枠に流し込み、テーブルバイブレーターで締固めをおこなった。なお、曲げ供試体の打設にあたっては、図-1に示すように、型枠の軸方向の端部から流し込んだ。また、鋼繊維を用いた場合には、繊維の分離を避けるためバイブレーターは使用しなかった。

2.5 養生方法

打設後、直ちに表面にラップをして、温度20℃の恒温室で2日間静置し、脱型後、養生を行った。本研究で行った養生の方法は温水養生と常温水中養生の2種類とし、温水養生については、90℃の温水で3日間とし、水中養



(a) モノフィラメントタイプ (3mm)



(b) 束状タイプ

写真-1 アラミド繊維

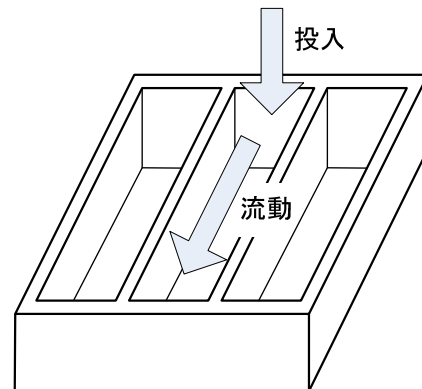


図-1 曲げ供試体の打設方法

表-2 使用繊維

名称	繊維の種類	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)
12μ-6mm	アラミド	45	6
3mm			3
6mm			6
8mm			8
12mm			12
12mm-収束		200	12
Steel	鋼繊維	200	15

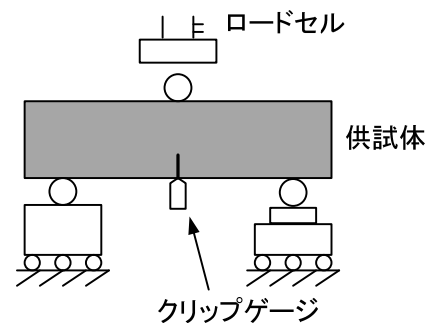


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験

生については、20℃の水中で28日間とした。

3. 検討項目

3.1 繊維混入量

打ち込み時の施工性を考慮して目標フロー値（0打）を200mmとして、各アラミド繊維に対して最大混入量を求めることとした。繊維の最大混入量を求める方法としては、繊維を少量ずつ投入して、その都度試料を採取してフロー値を計測し、さらに混入が可能な場合には試料を速やかにミキサーに戻し繊維を追加して練混ぜを行うという操作を繰り返すこととした。なお、比較のために採用した鋼繊維については、最大混入量の検討はせずに2%とした。

3.2 圧縮強度試験

3.1で求められた各繊維について混入量が最大の配合を対象とし、圧縮強度試験をおこなった。圧縮試験には容量2000kNの耐圧試験機を用い、1000kN用の球座を介して載荷した。供試体は1条件につき3体用いた。

3.3 曲げ強度試験

3.2と同様に3.1で求められた配合について、図-2に示すような切欠きはりの3点曲げ試験をおこない、荷重-開口変位曲線を計測した。試験は「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」⁴⁾（JCI-S-002-2003）に準じておこなうこととしたが、練混ぜ量の関係から40×40×160mm（切欠き深さ12mm）の角柱供試体を用いることとし、供試体数は1条件につき3体とした。

載荷には、手動メカニカルジャッキを使用し、荷重の検出には容量10kNのロードセル、開口変位の検出には精度1/2000mmのクリップゲージを用いた。

表-3 繊維混入量とフロー値

名称	混入量(%)	フロー値(mm)
12μ-6mm	1	119
3mm	2	273
	3	211
6mm	1	300<
	1.5	228
8mm	2	187
	1.25	201
12mm*	0.5	300<
	1	202
12mm-収束	1	256
	1.75	233
Steel	2	185
	2	270

■：供試体を採取した配合

*: W/B=0.21

3.4 引張軟化曲線

3.3で求められた荷重-開口変位関係から、逆解析⁴⁾により引張軟化曲線を推定した。ただし、逆解析には同一条件でおこなった3体の供試体の平均曲線を用いた。

4. 実験結果

4.1 フレッシュ性状

全てのバッチにおける繊維を混入する前のモルタルのフロー値は平均270mmであった。表-3に各繊維を混入したときフロー試験の結果を示す。なお、フロー試験では直径300mmのテーブルを使用したため、300mm以上のフロー値は計測していない。

繊維径が12μmの場合には、混入量を1%の時点でフローが119mmとなり、目標フロー値を得るには混入量をさらに少なくする必要があることが明らかとなった。混入量を多くできないということは、硬化コンクリートの曲げおよび引張特性も期待できないため、繊維径12μmの配合については、硬化後の試験を実施しなかった。

繊維径が45μmの場合には、繊維長が長くなると、また混入量が多くなるとフロー値が小さくなった。特に、繊維長が8mmと12mmの場合には、フロー値として200mmを確保するためには、混入率を1.0ないし1.25%以下にする必要があるのに対して、繊維長が3mm、6mmおよび12mm-収束については、2%程度まで混入できることが明らかとなった。また、繊維長が3mmの場合には3%まで混入可能であった。なお、12mmの場合には、混入量を多くすることができなかったため、水結合材比を0.19から0.21に修正して試験を行った。

以上の結果より各繊維の最大混入量を決定し、供試体を採取した配合を表-3中に示した。なお、12mm-収束の場合、混入量を2%とした場合に若干、分離の傾向が見られたため、混入量を1.75%とした。

4.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を表-4に示す。繊維長3mmで混入量3%とした配合において、90℃温水養生と20℃水中

表-4 圧縮強度試験結果

名称	繊維混入量(%)	養生方法	圧縮強度(N/mm ²)
3mm	3	水中養生	152
		温水養生	225
6mm	2		219
8mm	1.25		221
12mm*	1		183
12mm-収束	1.75		192
Steel	2		242

*: W/B=0.21

養生を比較すると、温水養生の方が 70N/mm^2 程度圧縮強度が高くなった。これは、高温にすることで、モルタルマトリクスの微細構造がより緻密になったためと考えられる。

アラミド繊維を用い温水養生をおこなったものを比較すると、繊維長が 3mm, 6mm, 8mm ではほとんど差

が見られず、 220N/mm^2 程度の圧縮強度となった。一方、繊維長 12mm および収束タイプのものについては、圧縮強度が低下する傾向が見られ、 $180\sim 190\text{N/mm}^2$ 程度となった。なお、繊維長 12mm のものは、水結合材比を 0.21 としているためこの影響も考えられる。鋼繊維を用いた場合の圧縮強度は 240N/mm^2 程度となり、アラミド繊維

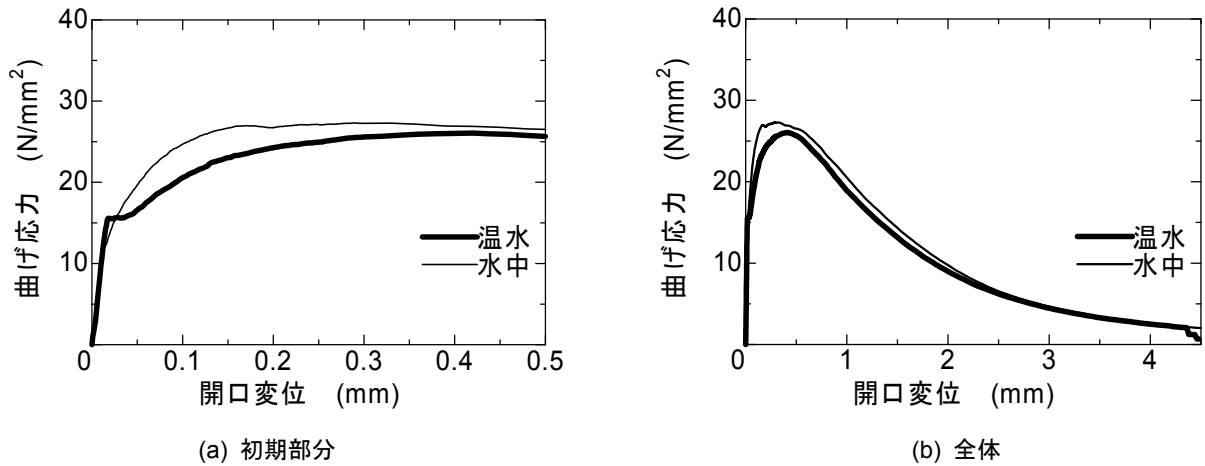


図-3 養生条件が異なる場合の荷重-開口変位曲線 (3mm, 3%)

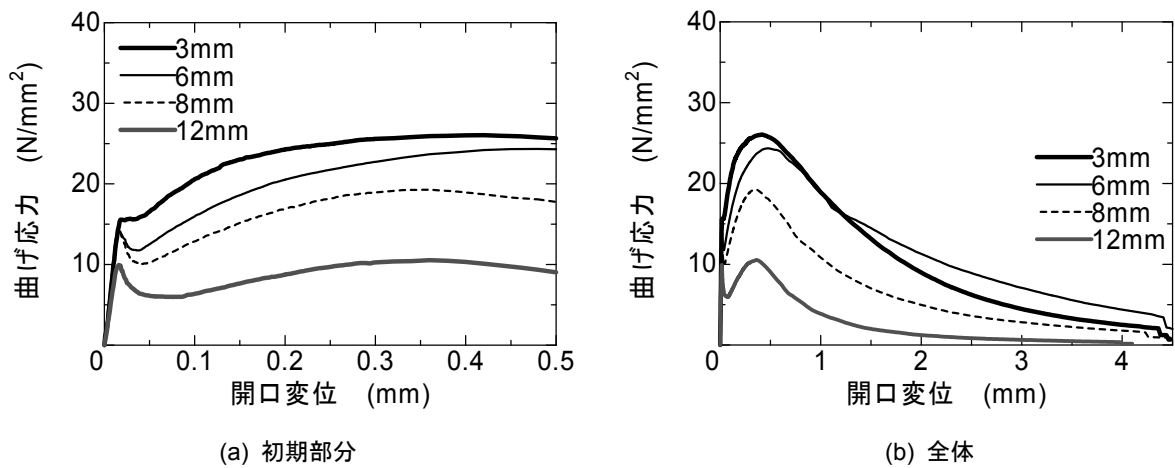


図-4 繊維長が異なる場合の荷重-開口変位曲線

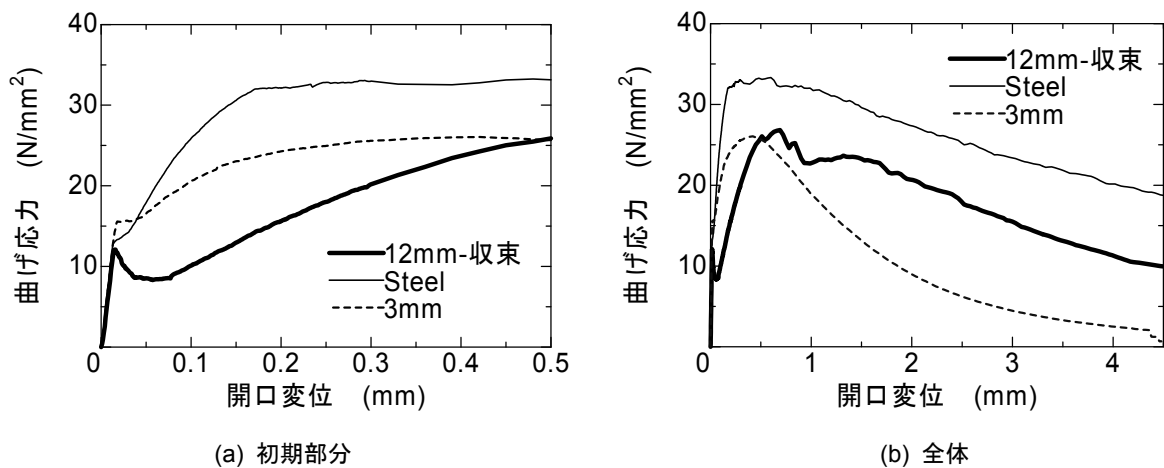


図-5 繊維の種類が異なる場合の荷重-開口変位曲線

を用いた場合より1割程度高くなった。

4.3 曲げ強度試験結果

図-3 から図-5 に切欠きはりの3点曲げ試験で得られた荷重-開口変位曲線(3体の平均)を示す。なお、図中の縦軸は荷重をリガメント断面の曲げ引張応力に換算して表示してある。

図-3 は、繊維長3mmで混入量を3%とした配合において、温水養生と水中養生を比較した結果を示す。両者にはほとんど差が見られず、養生方法の違いは圧縮強度には影響するが、曲げ特性にはほとんど影響しないことが明らかとなった。

図-4 には、モノフィラメントタイプの繊維で繊維長

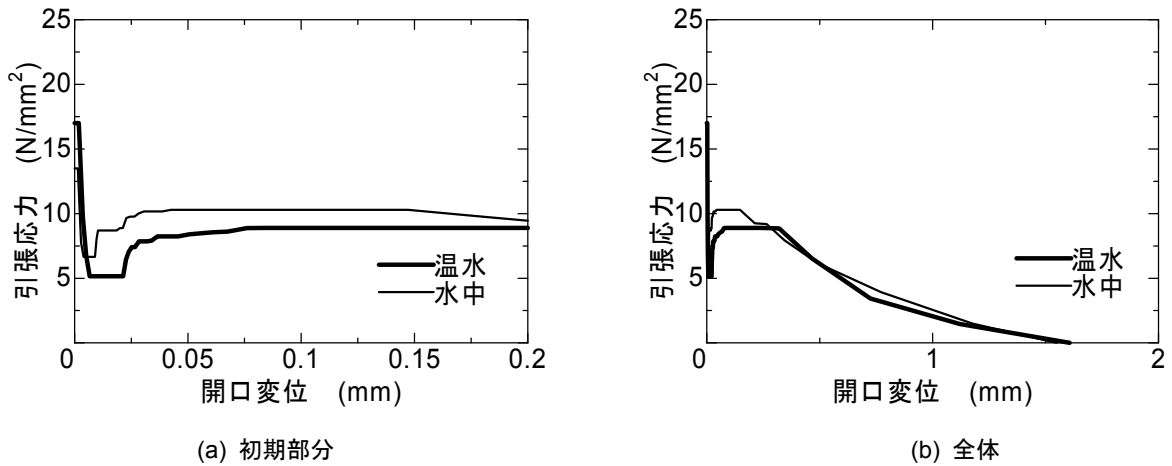


図-6 養生条件が異なる場合の引張軟化曲線(3mm, 3%)

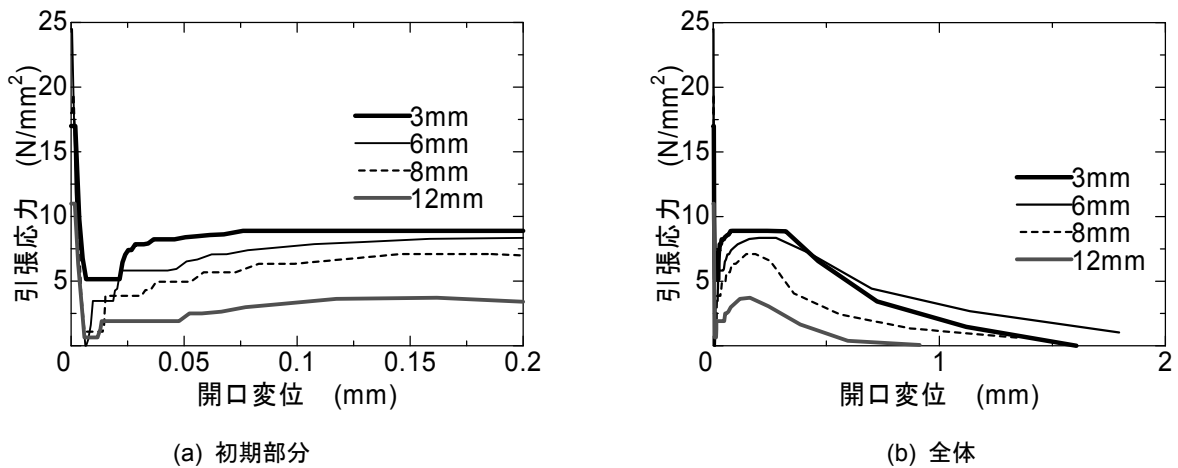


図-7 繊維長が異なる場合の引張軟化曲線

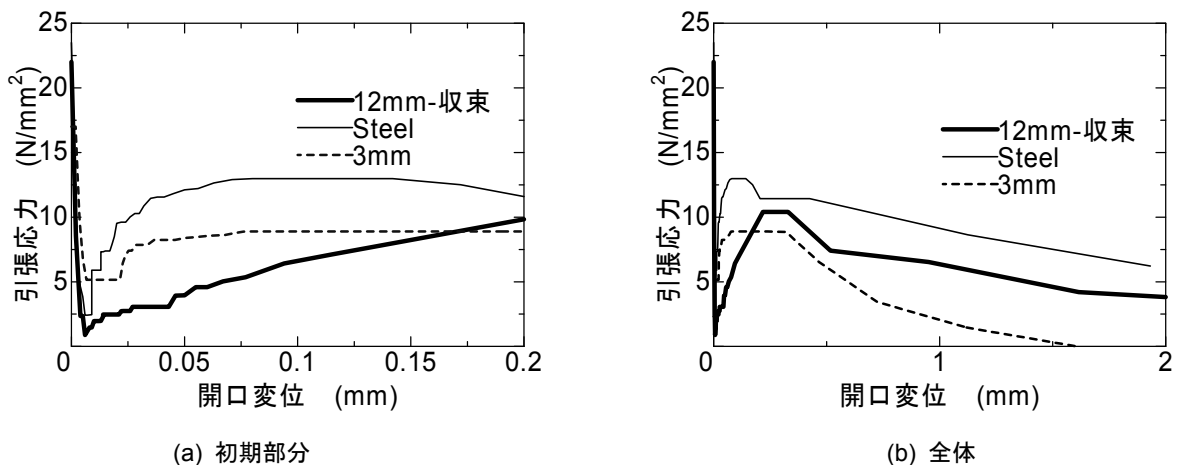


図-8 繊維の種類が異なる場合の引張軟化曲線

を変化させた場合の結果を示す。ただし、表-3 に示した通り、繊維長に応じて混入量も変化している。ひび割れ発生強度は繊維長が 8mm 以下の場合にはほとんど差は見られないが、繊維長 12mm のものは、他のものに比べ低下している。また、ひび割れ発生後の最大強度も、繊維長 3mm (混入量 3%) と 6mm (混入量 2%) ではほとんど差はみられないが、8mm、12mm と繊維長が長くなり混入量が少なくなるにつれて低下している。なお、繊維長 3mm 以外のものはいずれも、ひび割れ発生後に一旦、応力低下を生じ、その後、開口変位の増加にともなう繊維の架橋効果が効き始め応力が再び上昇し最大応力に達するという挙動を示した。

以上のことより、モノフィラメントタイプの繊維を用いてより高い曲げ強度を得るためには、繊維長 3mm もしくは 6mm の繊維を多く混入することが有効である。ただし、繊維長 6mm-混入量 2%の場合にはひび割れ発生直後に応力が低下する性状を有していることから、繊維長 3mm-混入量 3%の方が曲げ特性としては優れていると考えられる。

図-5 には、収束タイプのアラミド繊維と鋼繊維を比較した結果を示す。なお、比較のため前掲の 3mm の結果も併記した。この結果、鋼繊維を用いた場合には、ひび割れ発生後の剛性、強度、および強度点以降の吸収エネルギー、いずれも最も優れていることが示された。

収束タイプのアラミド繊維は、ひび割れ発生後の剛性が特に低い結果となった。これは、繊維を収束しているために、繊維の引張応力が同一の場合、繊維とモルタルマトリクス間の付着応力が高くなり、ひび割れ面での繊維の抜け出し量が大きくなるためと考えられる。

収束タイプのアラミド繊維を用いた場合の最大強度に関しては、3mm (混入量 3%)、6mm (2%) とほぼ同程度であり、鋼繊維の場合の 75%程度となった。

最大強度点以降の挙動に関しては、収束タイプのアラミド繊維の応力の低下の割合 (曲線の軟化勾配) は 3mm の繊維に比べ緩やかであり、鋼繊維のそれとほぼ同程度であった。これは、3mm の繊維の場合には、繊維長が短いために変形が小さい段階で繊維が完全に抜け出してしまふのに対して、収束タイプの場合には繊維長が長く、変位が大きい段階でも架橋効果を発揮するためであると考えられる。

4.4 引張軟化曲線

図-6 から図-8 に図-3 から図-5 に示した曲げ応力 (荷重) -開口変位曲線から逆解析によって求めた引張軟化曲線を示す。いずれの軟化曲線も軟化開始点 (マトリクスの引張強度に相当) は 15~20N/mm² 程度になり、その後急激に応力が低下し、その後、開口変位 (ひび割れ幅) の増加にともなう繊維の架橋効果が現れ、応力

が増加して最大強度に達し、軟化に至っている。引張軟化曲線における養生の影響、繊維長の影響および繊維の種類の影響は、それぞれ前節の曲げ応力-開口変位曲線とほぼ同様であるが、引張軟化曲線においては、マトリクスのひび割れ発生にともなう軟化、繊維の架橋効果による応力上昇、架橋応力の最大点、軟化という UFC の引張破壊過程の様子が曲げ応力-開口変位曲線に比べより明確に現れていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、アラミド繊維を用いた UFC の圧縮強度試験と切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い、曲げ強度試験の結果から逆解析によって引張軟化曲線を算出した。本研究で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 同体積量の繊維を混入した場合、繊維径が 12 μ m の繊維は、45 μ m の繊維に比べフロー値が小さくなり、混入が困難である。
- (2) 繊維径を 45 μ m とし、繊維長を 3mm から 12mm に変化させそれぞれ混入量を最大にした場合、UFC の力学特性に対しては 3mm-混入量 3%と 6mm-混入量 2%がもっとも有効である。
- (3) UFC の圧縮強度は温水養生と水中養生で差があるが、曲げおよび引張軟化特性においてはその影響は見られない。
- (4) 収束タイプの繊維は、ひび割れ発生後の剛性が低いが、架橋応力の最大値は繊維長 3mm あるいは 6mm の場合と同程度であり、鋼繊維の場合の 75%程度である。

本研究では、アラミド繊維を用いることで、鋼繊維を用いた場合の強度および靱性に近い結果が得られる可能性が示されたが、実用化にあたってはさらなる改良が必要と考えている。

参考文献

- 1) 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)、コンクリートライブラリーNo.113, 2004
- 2) 川口哲生, 片桐誠, 白井一義：超高強度繊維補強コンクリート部材の曲げ破壊性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.631-636, 2008
- 3) P. Richard and M. Cheyrezy: Composition of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- 4) JCI 規準：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