

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の力学特性

竹山 忠臣^{*1}・大森 慎也^{*1}・出井 丈也^{*2}・内田 裕市^{*3}

要旨：寸法の異なる集束タイプの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、フレッシュ性状および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、繊維長が長いと流動性が低下し繊維混入量を多くできないが、硬化後の力学特性は繊維長が長いほど優れていることが示された。また、集束タイプのアラミド繊維を用いることで鋼繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの力学特性に対して、同等もしくはそれ以上の性能が得られることが示された。

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、集束繊維、曲げ強度、引張軟化特性

1. はじめに

近年、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 180N/mm² 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。この指針を対象としている 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。既往の研究では、PVA 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⁾。一方、著者らは繊維径の太いアラミド繊維を用いることで、鋼繊維を用いた UFC に近い性能が得られることを報告した³⁾。

本研究では、鋼繊維に代わる繊維として、特に集束タイプの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を表-1 に示す。なお、この配合は既往の著者らの実験で用いたものと同一のものである³⁾。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+Ad)/(C+SF)）を 0.19 とした（混和剤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、混和剤には、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。

2.2 繊維の種類およびパラメータ

本研究では、繊維径（集束径）、繊維長の異なる集束タイプのアラミド繊維（写真-1）を用いた。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・テレフタラミド）の材料特性は、密度 1.39 g/cm³，引張強度 3410 N/mm²，引張弾性率 74 kN/mm²である。表-2 に使用した繊維の一覧を示す。集束タイプのアラミド繊維は繊維径 12μm の繊維 267 本をエポキシ系樹脂により集束して呼び径 200μm（実測平均 250μm）のスティック状に加工したものである。繊維長を 9, 12, 15, 18mm の 4 種類、また呼び径を 400μm（繊維径 12μm の繊維 667 本）に集束し繊維長を 15mm にしたものを 1 種類の合計 5 種類のアラミド繊維を用いた。

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、

表-1 モルタルの配合

W/B	単位量 (kg/m ³)					
	水 W	セメント C	シリカフューム SF	珪石粉末 SP	珪砂 S	高性能減水剤 Ad
0.19	182	987	228	386	494	49

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

*3 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博（正会員）



写真-1 アラミド繊維

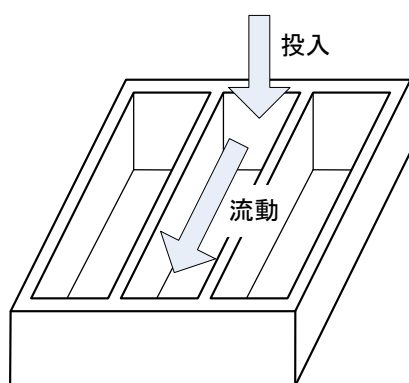


図-1 曲げ供試体の打設方法

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。

2.4 供試体の打設

本研究で使用した圧縮供試体は $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体、曲げ供試体は $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ の角柱供試体である。繊維長が 15mm と 18mm の場合には本実験で用いた供試体の寸法は繊維長に対して若干小さいが、供試体寸法の影響を回避することおよびミキサーの容量の関係から小型の供試体を用いることとした。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。

2.5 養生方法

打設後、直ちに表面にラップをして、温度 20°C 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し、 90°C の温水で 3 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、各繊維に対して最大混入量を求めた。繊維の最大混入量を求める方法としては、繊維を少量ず

表-2 使用繊維一覧

名称	繊維の種類	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)
9mm	アラミド 繊維	200	9
12mm			12
15mm			15
18mm			18
400 μm		400	15

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した。また、同一混入量における比較も行うため、それぞれの配合における混入量を 1% としたものについても検討した。

3.2 圧縮強度試験

3.1 で求められた各繊維についての配合を対象とし、圧縮強度試験をおこなった。圧縮強度試験には容量 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 $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ の曲げ供試体を用いて、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、供試体数については 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。

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 体の供試体の同一変位に対する荷重を平均した荷重-開口変位曲線を用いた。

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フローは 310mm 程度であった。表-3 に各繊維を混入したときのフロー試験の結果を示す。

繊維混入量が 1% 程度の場合、フローは 250~300mm に達するのに対して、混入量を 1.75% 程度まで増やすとフローは 200mm 程度まで低下した。また、繊維長が長いものほどフローは低下しており、短いものほど繊維を

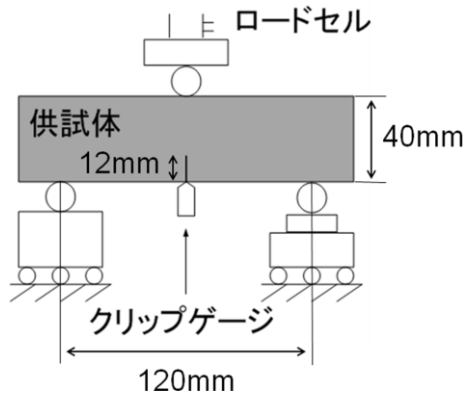


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験

表-4 圧縮強度

名称	混入量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
集束 9mm	1	183
	3	167
集束 12mm	1	228
	1.75	192
集束 15mm	1	210
	1.75	187
集束 18mm	1	223
	1.75	196
集束 400μm	1	189
	1.75	182

多く混入することができ、繊維長 9mm については、3% 程度まで混入可能であった。なお、繊維長 12mm の場合、混入量を 2%にした場合に若干、繊維とマトリクスの分離の傾向が見られたために 1.75%として供試体采取了。また、繊維長 15mm, 18mm のものについても繊維を 1.75%混入したものは若干の分離の傾向が見られた。

4.2 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を表-4 に示す。いずれの配合においても、圧縮強度はほぼ 200N/mm² 程度であったが、混入量が多いほど低下する傾向がみられた。特に繊維長 9mm で混入量を 3%としたものは強度が低くなったが、これは他のものよりも繊維混入量が 1%程度多いことが原因として考えられる。

4.3 曲げ強度試験結果

図-3～図-6 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切欠きの断面を除いた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。また、図-4～図-6 に比較のために同一のマトリクスで鋼繊維（繊維径 200μm, 繊維長 15mm, 引張強度 2000N/mm²）を 2%

表-3 繊維混入量とフロー値

名称	混入量 (%)	フロー値 (mm)
9mm	1	300※
	2.5	312
	2.75	275
	3	240
12mm	1	288
	1.75	233
	2	185
15mm	1	256
	1.75	275
18mm	1	274
	1.25	286
	1.75	214
400μm	1	292
	1.75	213

■：供試体采取了配合

※：フローテーブルのサイズを超えたため計測

不能

混入した場合の結果³⁾も併記した。

図-3 に繊維径を 200μm, 混入量を 1%として繊維長を変化させた場合の結果を示す。ひび割れ発生強度は繊維長にかかわらず、ほとんど差は見られなかった。また、いずれもひび割れが発生してから一旦、応力低下を生じ、開口変位の増加とともに繊維の架橋効果により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。ただし、繊維長が長いもののほどひび割れ発生後の応力低下が小さくなった。最大強度については繊維長 9mm と 12mm は同程度になり、また繊維長 15mm と 18mm も両方で差がなく、繊維長 9mm と 12mm の 1.7 倍程度となった。これより繊維長 15mm ないし 18mm が曲げ特性に対して有効であると考えられる。

図-4 に繊維径を 200μm とし、各繊維長の混入量を最大にしたときの結果を示す。繊維長 12mm のものについては、ひび割れ発生後応力低下を生じたが、他の種類については、ひび割れ発生後の応力低下はほとんど生じなかった。

また、繊維長 9mm－混入量 3%のものについては、ひび割れ発生後の応力低下は小さくなっているが、最大強度は繊維長 12mm－混入量 1.75%のものとほとんど変わらず、開口変位の増加とともに繊維の抜け出しが生じていると考えられる。また、繊維長を 15mm ないし 18mm としたもののについては繊維長 9mm－混入量 3%および繊維長 12mm－混入量 1.75%よりひび割れ後の剛性および

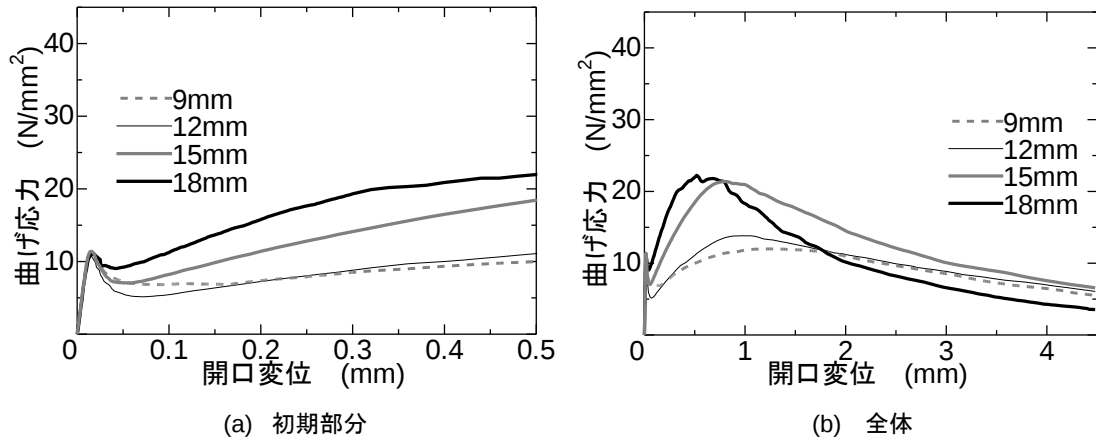


図-3 繊維長が異なる場合の荷重-開口変位曲線 (混入量 1%)

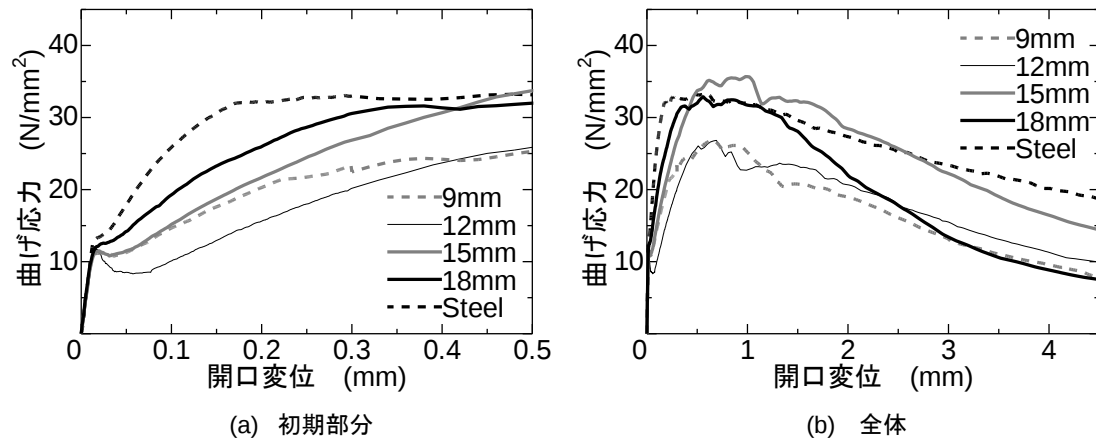


図-4 繊維長が異なる場合の荷重-開口変位曲線 (混入量最大)

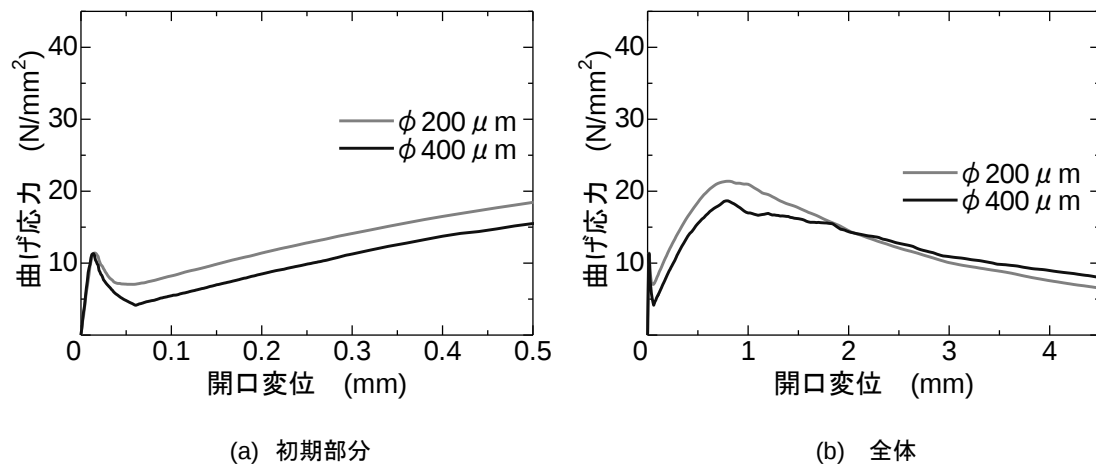


図-5 繊維径が異なる場合の荷重-開口変位曲線 (繊維長 15mm-混入量 1%)

強度が高く、混入量 1%での結果 (図-3) と同様、繊維長が 12mm 以下では、高い曲げ強度およびひび割れ後の剛性を得るためには繊維長が不足していると考えられる。なお、繊維長 15mm と 18mm では最大荷重前では 18mm の方が剛性が高くなったが、最大荷重後は 15mm の方が応力低下が小さくなった。

また、鋼繊維を用いた場合、ひび割れ発生後の剛性の低下は見られず、強度、および強度点以降の吸収エネルギーは優れている。しかし、アラミド繊維で繊維長を

15mm ないし 18mm とし混入量 1.75% とすることで、最大強度は鋼繊維を用いた場合と同等となった。また、繊維長を長くすることで、ひび割れ発生後の剛性も高くなり、鋼繊維に近づくことが分かった。

図-5 には、繊維長を 15mm、混入量を 1% とした繊維径 200μm と 400μm の結果を示す。ひび割れ発生後の応力は 400μm の方が若干低いですが、全体で比較すると、荷重-開口変位曲線はほとんど差が見られない。

図-6 には、繊維長を 15mm、混入量を 1.75% とした場

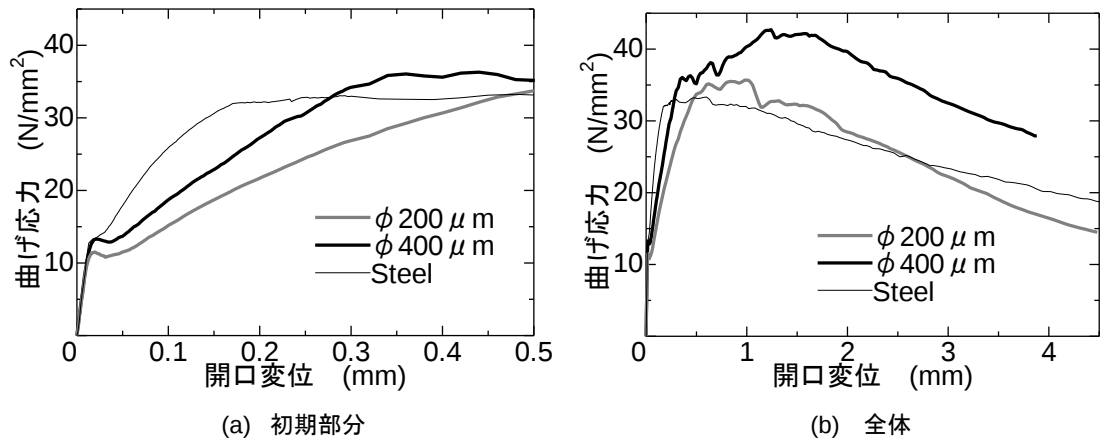


図-6 繊維径が異なる場合の荷重-開口変位曲線（繊維長 15mm-混入量 1.75%）

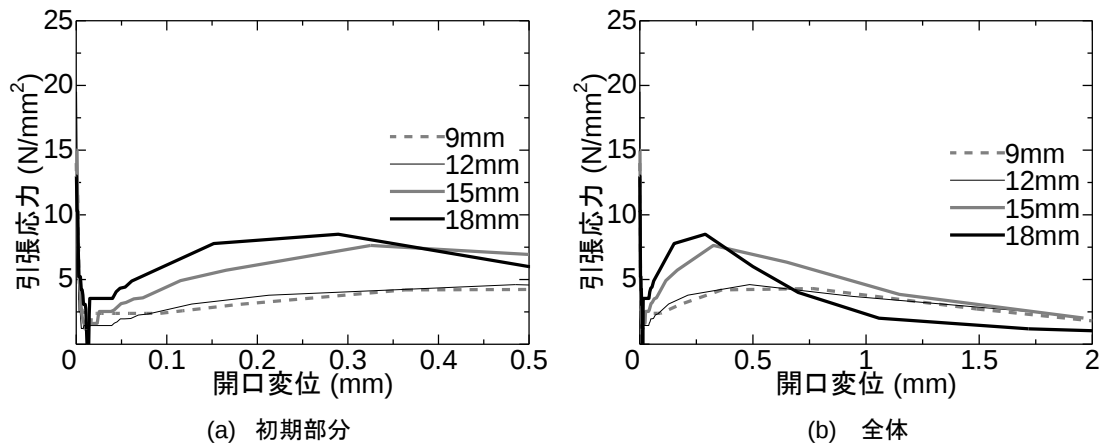


図-7 繊維長が異なる場合の引張軟化曲線（混入量 1%）

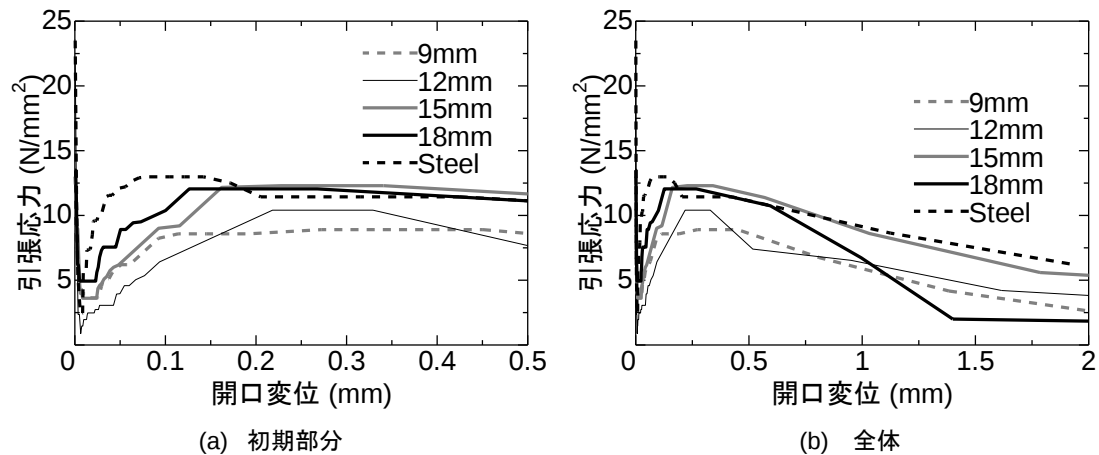


図-8 繊維長が異なる場合の引張軟化曲線（混入量最大）

合の繊維径 200 μ m と 400 μ m の結果を示す。繊維径 400 μ m は、ひび割れ発生後の剛性は鋼繊維よりも低い、最大強度は鋼繊維より高く、最大強度点以降の応力の低下度合（曲線の軟化勾配）は 200 μ m、400 μ m ともに鋼繊維のそれとほぼ同程度である。また、200 μ m と 400 μ m を比較すると、図-5 に示した混入量 1% の場合の結果とは逆に 400 μ m の方がひび割れ後の剛性と強度が高く、繊維径 200 μ m よりも 400 μ m の方が曲げ特性に対しては有効であるという結果となった。これは、繊維が引き抜けず、繊維径が太い方が繊維 1 本当りの引張力を大きくするこ

とができたためと考えられるが、さらなる検討が必要であると考えている。

4.4 引張軟化曲線

図-7～図-10 に図-3～図-6 に示した曲げ応力（荷重）-開口変位曲線から逆解析により算出した引張軟化曲線を示す。マトリクスにひび割れ発生後、一度急激に応力が低下し、その後、繊維の架橋効果により、応力が上昇しピーク（ひび割れ強度には達しない）に至り、軟化に至っている。全ての引張軟化曲線について、前節の曲げ応力-開口変位曲線とほぼ同様の傾向がみられた。

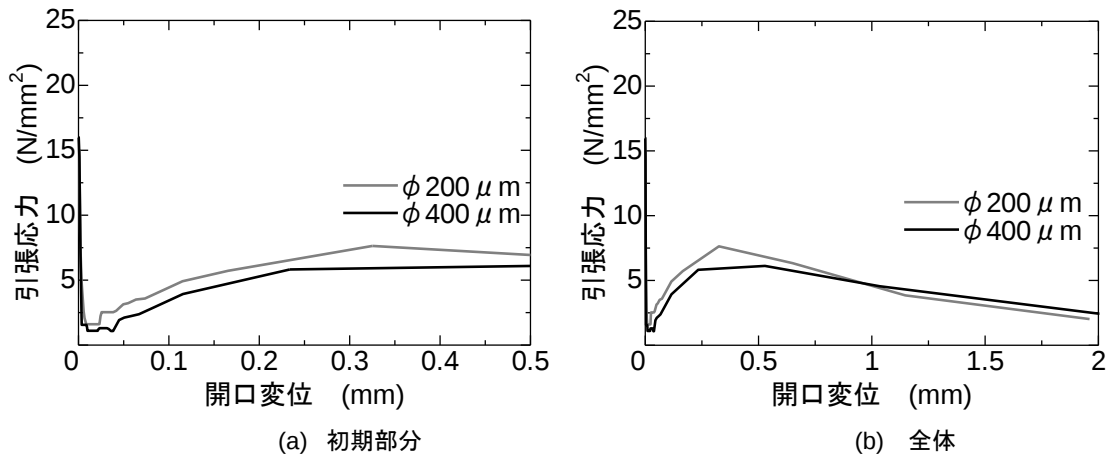


図-9 繊維径が異なる場合の引張軟化曲線（繊維長 15mm—混入量 1%）

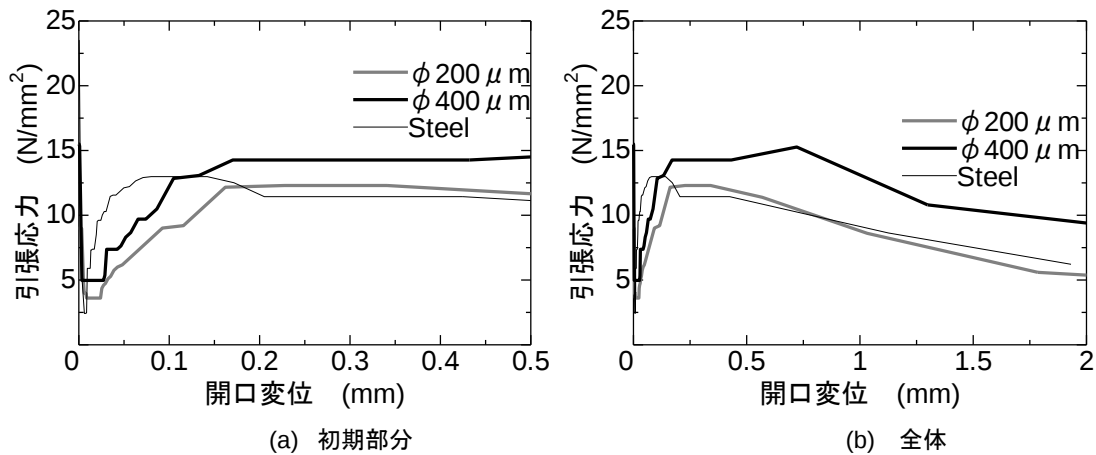


図-10 繊維径が異なる場合の引張軟化曲線（繊維長 15mm—混入量 1.75%）

5. まとめ

本研究では、集束タイプの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り引張軟化曲線を算出した。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 繊維長を 9mm とした場合には混入量を 3% としてもフローは 200mm 以上となるが、繊維長が 12mm～18mm では混入量 1.75～2% でフローは 200mm 程度になる。
- (2) 圧縮強度は、繊維の混入量を増やすと低下する傾向にある。
- (3) 曲げ特性に着目した場合、繊維径を 200μm とした集束タイプの繊維の繊維長は 15mm ないし 18mm 程度が有効であると考えられる。
- (4) 混入量を 1% とした場合、繊維径 200μm と 400μm で差が見られなかったが、混入量 1.75% とした場合には 400μm の方が初期剛性、強度とも優れている結果となった。

本実験により、繊維長を 15mm ないし 18mm とした集束タイプのアラミド繊維を用いることにより、鋼繊維を用いた UFC より曲げ強度および靱性が高くなり、アラミ

ド繊維を用いることにより鋼繊維と同等以上の力学特性が得られる可能性が示された。しかしながら、本論文で示した結果は小型の供試体による結果であり、今後さらに大きな供試体による検討が必要であると考えている。

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) 竹山忠臣，小川義宏，出井丈也，内田裕市：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.313-318, 2009
- 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