

# 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

Nguyen Khanh Thy<sup>\*1</sup>・周 波<sup>\*1</sup>・大森 慎也<sup>\*1</sup>・内田 裕市<sup>\*2</sup>

**要旨：**繊維長が 15, 20, および 25mm の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について、フレッシュ時の流動性、圧縮特性および引張軟化特性を検討した。その結果、繊維長 20mm が最適であることが示された。つづいて、繊維長 20mm の超高強度繊維補強コンクリートについて自己収縮、圧縮特性および鉄筋コンクリートはり部材に適用した場合のせん断耐力について検討した。その結果、自己収縮ひずみは 1300 $\mu$ 、圧縮強度は 170N/mm<sup>2</sup> 程度であり、引張軟化時の引張応力は鋼繊維を用いた場合の 80% 程度であることが示された。また、鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は、鋼繊維を想定した計算値の 90% 程度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、引張軟化特性、自己収縮、せん断耐力

## 1. はじめに

近年、短繊維を用いた様々な高性能セメント系複合材料が開発されており、その一つに超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と略す）がある。UFC においては超高強度を得るために、高強度の鋼繊維を用いるのが一般的である。また、UFC のマトリクスも超高強度を得るために、極めて緻密な組織となっており、その結果、塩害環境下においても鋼繊維の腐食はほとんど生じないとされている。しかし、ひび割れが発生した場合には、ひび割れに沿って腐食因子が侵入し、ひび割れを架橋している鋼繊維が腐食する可能性が考えられる。そのため、土木学会の UFC 設計施工指針<sup>1)</sup>では、使用時にはひび割れを許容しないこととしている。

そこで筆者らは、鋼繊維の代わりに腐食の可能性がない合成繊維を用いた UFC を開発することを目的として、合成繊維のなかでも高強度、高弾性であるアラミド繊維に着目して検討を行ってきた。昨年までの検討の結果<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>、モノフィラメント（繊維径：12~40 $\mu$ m）タイプの繊維を用いるより、モノフィラメントの繊維を収束しスティック状にした収束タイプの繊維の方が、優れた力学性能が得られることを明らかになった。また、繊維長さに関しては 9~18mm の範囲で変化させたところ、長い繊維の方が有利であることが判明し、さらに長い繊維について検討することが課題となった。

本研究では、収束タイプのアラミド繊維を対象として、

繊維長を 15, 20 および 25mm の 3 種類に変化させ、引張軟化特性に着目して繊維長の最適化を行った。さらに、最適化された繊維を対象として、自己収縮特性、圧縮特性、および鉄筋コンクリートはり部材に適用した場合のせん断耐力について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 繊維長に関する実験

#### (1) 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。結合材として低熱ポルトランドセメント（密度：3.21g/cm<sup>3</sup>）とシリカフェーム（密度：2.2g/cm<sup>3</sup>）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/cm<sup>3</sup>、比表面積 8180cm<sup>2</sup>/g）を用い、細骨材には 6 号珪砂（密度：2.6g/cm<sup>3</sup>）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。

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/cm<sup>3</sup>、引張強度 3410 N/mm<sup>2</sup>、引張弾性率 74 kN/mm<sup>2</sup> である。本実験で用いた収束繊維は、繊維径 12 $\mu$ m の繊維を 267 本収束してエポキシ系樹脂で呼び径 200 $\mu$ m（実測平均 250 $\mu$ m）のスティック状に成形したものである（図-1）。

表-1 モルタルの配合

W/B	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	水 W	セメント C	シリカフェーム 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 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博（正会員）



図-1 収束タイプのアラミド繊維

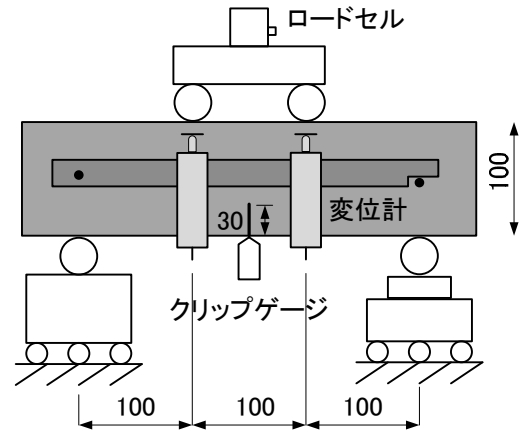


図-2 切欠きはりの3等分点曲げ試験

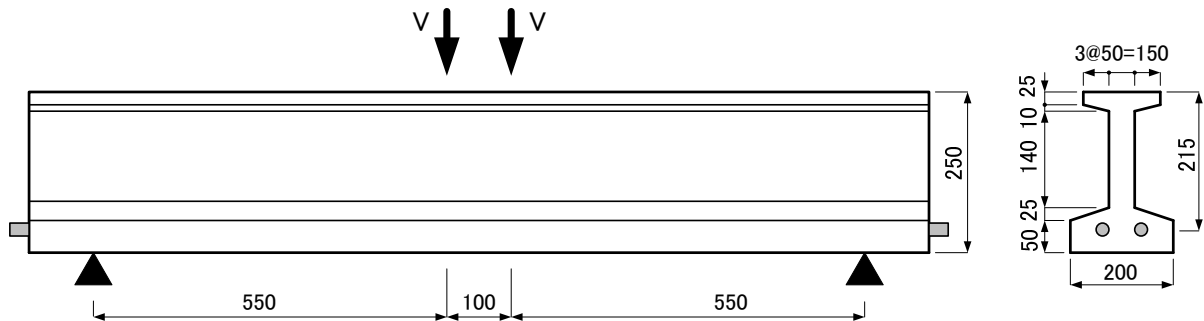


図-3 鉄筋コンクリートはり

繊維長は 15, 20 および 25mm の 3 種類とした。また、繊維の混入量は、フレッシュ時の流動性を考慮してすべて 1.75vol% とした。

### (2) 供試体の製作

練混ぜには容量 120l の 2 軸強制練りミキサーを用いた。練混ぜ時間を短縮するため、セメントを分割投入することとし、モルタルの材料のうちセメントの 1/2 を残して練混ぜを行い、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、繊維を投入し練混ぜた。

供試体には 100×100×400mm の曲げ供試体を用いた。コンクリートを型枠の一方の端部から流し込み、テーブルパイプを用いて外部から締め固めを行った。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、90℃ で 2 日間蒸気養生を行った。養生終了後、供試体中央にコンクリートカッターにより深さ 30mm の切欠きを設けた。供試体数は 1 条件につき 4 体とした。

### (3) 曲げ載荷試験

図-2 に示すように、荷重はスパン 300mm の 3 等分点曲げ載荷とし、荷重、載荷点変位および開口変位を計測した。荷重の計測には容量 100kN のロードセルを、載荷

点変位の計測には精度 1/500mm の高感度変位計、開口変位の計測には精度 1/2000mm のクリップゲージを用いた。計測された荷重-開口変位 (P-CMOD) 関係および荷重-載荷点変位 (P-LPD) 関係から、逆解析<sup>4)</sup>により引張軟化曲線を推定した。ただし、逆解析では同一条件の 4 体の供試体の平均の荷重-変位曲線を用いた。

## 2.2 自己収縮、圧縮およびせん断耐力に関する実験

前節 2.1 の試験結果から最適な繊維長を選択し、その繊維を用いたコンクリートについて自己収縮および圧縮応力-ひずみ曲線の測定を行った。さらに同一コンクリートを用いた I 形断面の鉄筋コンクリートはりを製作して、せん断耐力について検討した。なお、後述の通り選択した繊維長は 20mm であり、繊維混入量 (1.75vol%)、使用材料、配合、および養生方法等はすべて前節 2.1 と同様とした。

### (1) 自己収縮の計測

供試体には 100×100×400mm 角柱供試体を用いた。離型剤を塗布した鋼製型枠の中央に埋設ゲージをセットしてコンクリートを直接流し込み、打設直後から蒸気養生を完了するまで、ひずみと温度変化を計測した。供試体は 3 体用い、計測結果はそれらの平均値とした。

表-2 フローと圧縮強度

繊維長 (mm)	フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
15	287×277	172.8
20	236×241	178.1
25	206×223	166.5

(2) 圧縮強度試験

供試体はφ75×150mmの円柱供試体を用いた。载荷には容量2000kNの耐圧試験機を用い、1000kN用の球座を介して载荷した。供試体にひずみゲージを貼り、応力-ひずみ曲線を計測した。供試体は4体とした。

(3) RCはりのせん断耐力試験

供試体は図-3に示すように、I形断面のせん断補強筋のないRCはりである。UFCの場合、せん断補強筋が無い場合であってもせん断耐力が高くなるため、断面をI形とし主鉄筋には異形PC鋼棒(D22,  $f_{sy}=1191\text{N/mm}^2$ )を用いることとした。载荷は $a/d=2.56$ とした4点载荷とし、せん断破壊するまで単調に载荷した。供試体数は2体である。

3 実験結果

3.1 繊維長に関する実験

(1) フローと圧縮強度

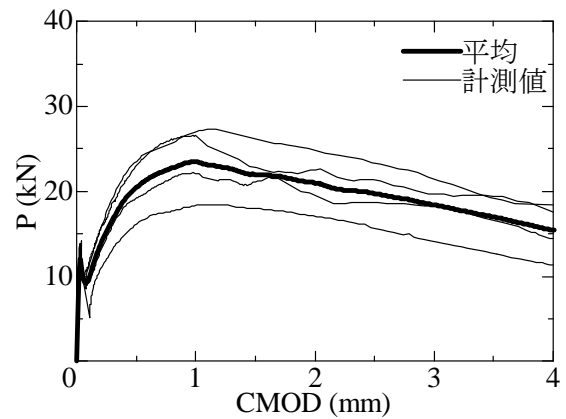
表-2に練混ぜ直後のゼロ打モルタルフローを示す。いずれ繊維長の場合も繊維がだまになったり分離したりするようなことはなかったが、フローは繊維長が長くなるにつれて低下した。したがって、流動性の観点からは繊維長は短い方が有利であると言える。なお、繊維長さ25mmの場合のフローは約200mmであり、型枠にコンクリートを流し込むうえではほぼ限界であり、これを下回ると自己充填はかなり困難となる。

表-2に示す通り、圧縮強度に関しては $170\text{N/mm}^2$ 程度であり、3種類の繊維長での差は $10\text{N/mm}^2$ 程度であった。

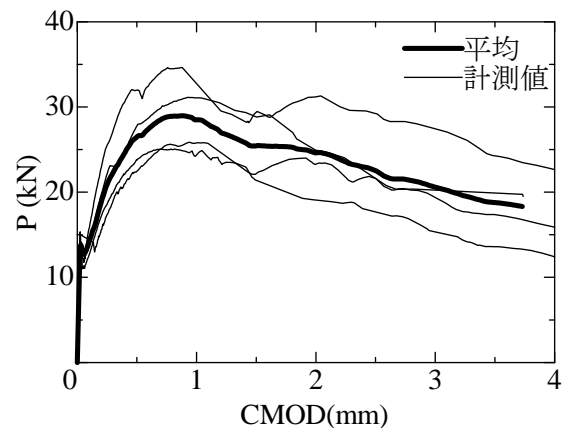
(2) 曲げおよび引張軟化特性

図-4と図-5に各繊維長のP-CMOD曲線とP-LPD曲線を示す。これらの図より、繊維長20mmと25mmではほとんど差はなく、繊維長15mmは強度が小さいことがわかる。また、P-CMOD曲線とP-LPD曲線は変位の絶対値は異なるものの、ほぼ相似の形状となっている。

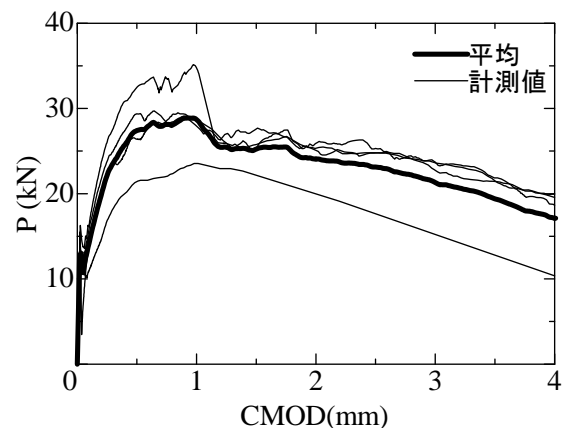
図-6と図-7にP-CMOD曲線とP-LPD曲線から逆解析により求めた引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線もP-CMOD曲線とP-LPD曲線と同様、繊維長20mmと25mmではほとんど差はなく、繊維長15mmは強度が小さくなっている。また、P-CMOD曲線とP-LPD曲



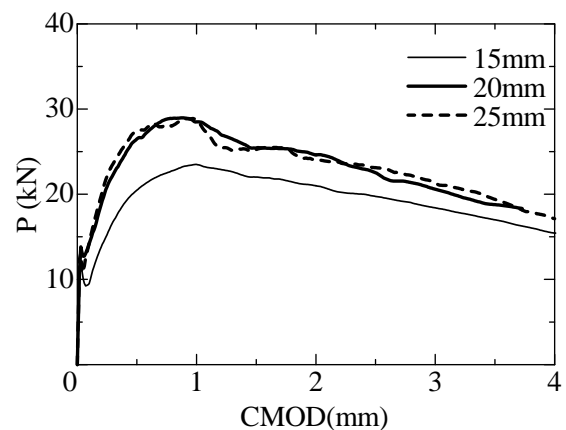
(1) 15mm



(2) 20mm



(3) 25mm



(4) 平均P-CMOD曲線の比較

図-4 P-CMOD曲線

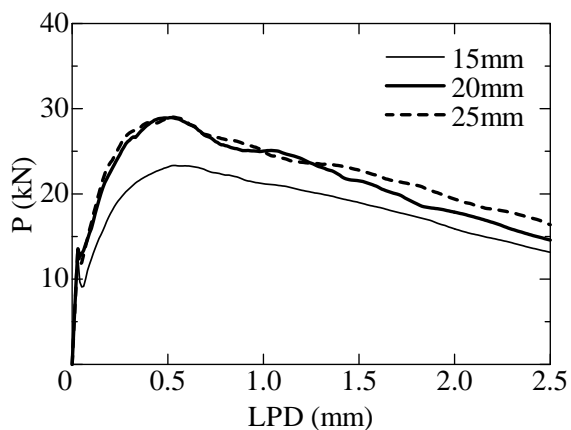


図-5 P-LPD 曲線

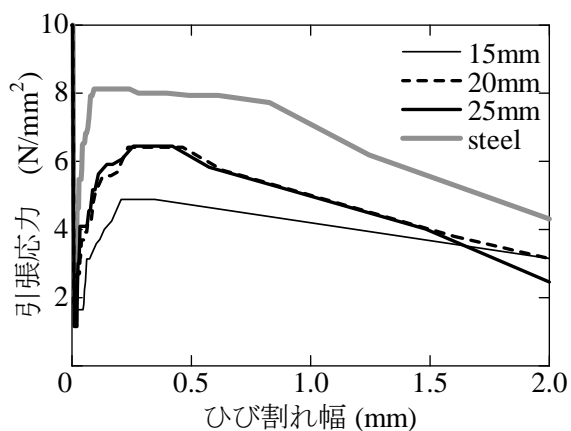


図-6 P-CMOD から求めた引張軟化曲線

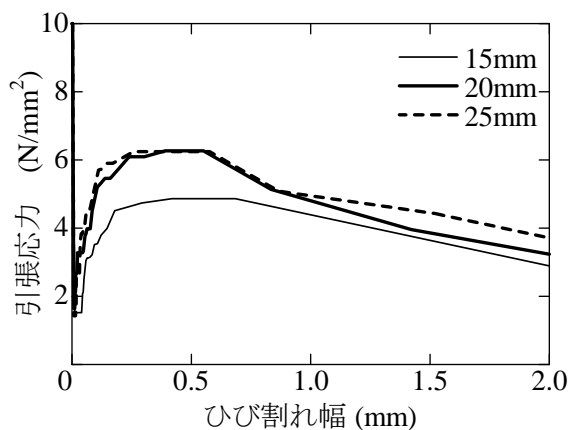


図-7 P-LPD から求めた引張軟化曲線

線から求めた引張軟化曲線はほぼ一致しており、引張軟化曲線を求めるうえでは、開口変位か載荷点変位のいずれかを計測すればよいことが確認できた。

図-6 には比較として同一のモルタルで鋼繊維（繊維径  $200\mu\text{m}$ 、繊維長  $15\text{mm}$ 、引張強度  $2000\text{N}/\text{mm}^2$ ）を  $2.0\text{vol}\%$  混入した場合の結果<sup>5)</sup>を示す。アラミド繊維（ $1.75\text{vol}\%$ ）を用いた場合の引張応力は鋼繊維（ $2.0\text{vol}\%$ ）の  $80\%$  程度となっている。なお、ここで比較の対象とした鋼繊維補強 UFC は土木学会指針案で標準とされているものとは異なったものである。

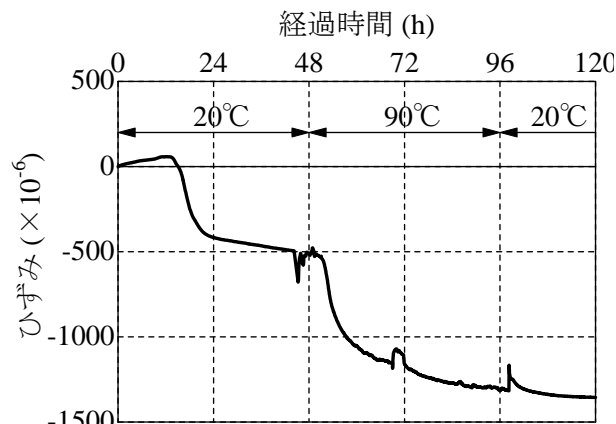


図-8 自己収縮ひずみ

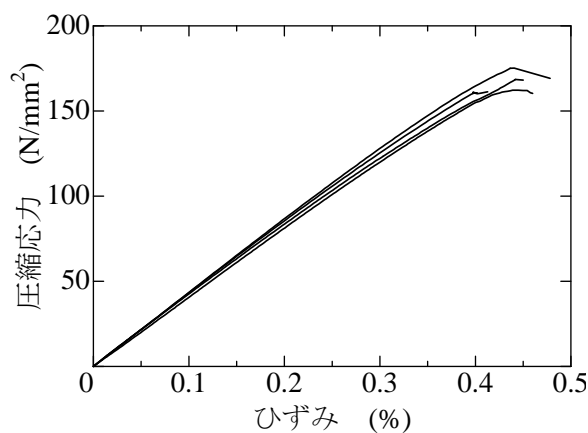


図-9 圧縮応力-ひずみ曲線



図-10 圧縮供試体の破壊状況

以上のことより、圧縮および引張特性の観点からはアラミド繊維の繊維長は  $20\text{mm}$  ないし  $25\text{mm}$  が適当であるが、施工性（流動性）も考慮すると繊維長さ  $20\text{mm}$  がもっとも適当であると考えられる。そこで、自己収縮およびせん断耐力に関しては繊維長を  $20\text{mm}$  として試験を行うこととした

### 3.2 自己収縮、圧縮およびせん断耐力に関する実験

#### (1) 自己収縮特性

図-8 に打設直後からのひずみの変化（温度ひずみは除去）を示す。打設直後から 15 時間程度までは若干膨張を示し、その後、急激に収縮が生じ材齢 20 時間で収縮は  $400\mu$  程度になった。収縮の開始が 15 時間程度となったのは、混和剤量が多いため凝結が遅延しているためであり、また 15 時間までの初期の膨張は水和熱および室温の変化による温度補正の誤差であると考えられる。材齢 20 時間以降は、収縮の増加は緩やかであり、 $20^{\circ}\text{C}$ 、48 時間の養生中に  $500\mu$  程度の収縮となった。その後、蒸気養生を開始すると再び収縮が急激に増加し、蒸気養生終了時（打設開始から 96 時間）には収縮ひずみは  $1300\mu$  程度に達した。蒸気養生終了以降は、収縮はほぼ完了した。本研究で採用した配合は試行的なもので、自己収縮を低減するための対策は特に取っていないが、実用化に向けては、材料面での収縮低減対策、設計・施工面での収縮に対する対応が必要であると考えている。

### (2) 圧縮特性

図-9 に円柱供試体の圧縮試験時に計測された圧縮応力-ひずみ曲線を示す。ヤング係数は  $42.4\text{kN/mm}^2$ 、圧縮強度は  $167.0\text{ N/mm}^2$  で表-2 の結果とほぼ同程度であった。本試験では荷重制御で载荷したためポストピークは計測できていないが、ピーク以降爆裂音をともなって破壊しても繊維の効果により供試体が粉砕することはなく、円柱の状態を保持していた。（図-10）

### (3) RC はりのせん断耐力

表-3 に試験結果を、図-11 と図-12 にせん断力-たわみ（スパン中央）曲線と試験終了後のひび割れ状況を示す。せん断ひび割れ（図-12 中の細線）は、せん断力が  $40\text{kN}$  程度から発生しはじめ、せん断補強筋を配置していないにもかかわらず、細かく分散して発生した。最大荷重直前にウェブ部分の 1 ないし 2 本の斜めひび割れが急激に拡大して破壊に至った。最終的なせん断破壊面（図中の太線）は、それ以前に細かく分散して発生したひび割れに比べ、その角度が大きい（立っている）傾向が見られた。

表-3 には土木学会 UFC 設計施工指針案<sup>1)</sup>にしたがって計算されたせん断耐力を示す。ここで、安全係数はすべて 1.0 とし、アラミド繊維の場合は本実験の材料特性を採用し、圧縮強度  $f_c$  を  $170\text{N/mm}^2$ 、斜めひび割れ直角方向の平均引張強度  $f_{vc}$  は図-6 の引張応力から  $6.0\text{ N/mm}^2$ 、ひび割れ角度  $\beta_u$  を  $40^{\circ}$  とし計算した。また、参考のための鋼繊維の場合には、指針案に示されている材料特性を採用して、 $f_c=180\text{N/mm}^2$ 、 $f_{vc}=8.8\text{ N/mm}^2$ 、 $\beta_u=40^{\circ}$  とし計算した。

実験で得られたせん断耐力は計算値（アラミド繊維）より 20%程度高い結果となり、指針案式に対しては安全側の結果となった。なお、鋼繊維を対象とした指針案式

表-3 せん断試験の結果

試験体	せん断耐力 (kN)		
	実験	計算	
		アラミド	鋼繊維
No.1	107.8	92.1	124.0
No.2	120.0		

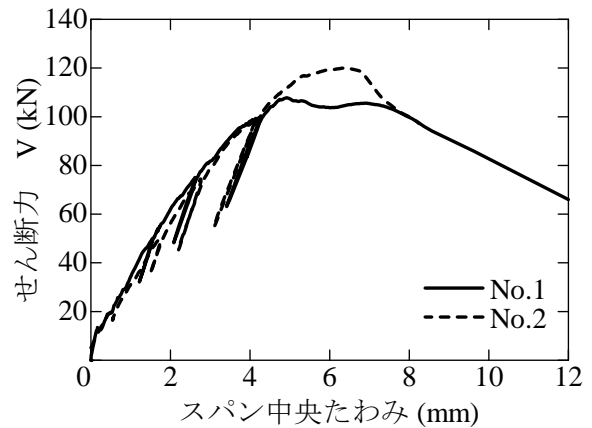


図-11 せん断力-たわみ曲線

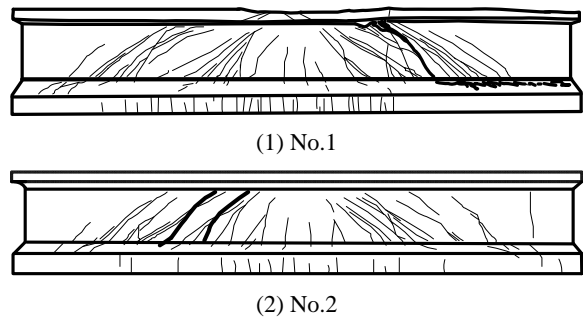


図-12 RC はりのひび割れ状況

は実験の平均値に対して 15%程度高くなることがわかっており、アラミド繊維の場合も指針案式を適用すると実験値は計算値に対して同程度の余裕度があり、したがってアラミド繊維の場合も指針案式を準用できるものと考えられる。

また、実験値は鋼繊維を想定して求めた計算値の 90%程度となっている。これは 3.1 で述べた、鋼繊維に比べアラミド繊維は引張軟化曲線の応力が低いことが影響しているものと考えられる。アラミド繊維を用いた場合のせん断耐力は、鋼繊維を用いた場合より劣るものの、設計上、十分に期待できるものと考えられる。なお、計算ではせん断耐力に対するフランジの影響を無視していること、試験体の寸法が比較的小さいこと、データ数が少ないことなどは今後の課題であると考えている。

## 4. 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

の力学特性について実験的に検討した。実験で得られた主な結果を以下に要約する。

- (1) 15, 20, 25mm の 3 種類の繊維長について比較した結果、フレッシュ時のフローは繊維長が長くなるにつれて小さくなった。圧縮強度は繊維長にかかわらずほぼ一定で  $170\text{N/mm}^2$  であった。引張軟化特性は、20mm と 25mm では差はなく、15mm は劣る結果となった。以上のことから、本研究では繊維長 20mm が最適であると判断された。
- (2) 繊維長 20mm の場合、自己収縮は  $1300\mu$  程度生じた。ヤング率は  $42.4\text{kN/mm}^2$  であり、引張軟化曲線の応力は、同一のモルタルマトリックスで鋼繊維を用いた UFC の 80% 程度であった。
- (3) アラミド繊維を用いた鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は、土木学会指針案式によって安全側に評価でき、本実験のせん断耐力は同一のモルタルマトリックスで鋼繊維を用いたとして計算されるせん断耐力の 90% 程度であった。

【謝辞】アラミド繊維は帝人テクノプロダクツ(株)より

提供していただきました。ここに記し謝意を表します。

#### 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) 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
- 3) 竹山忠臣，大森慎也，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の力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1253-1258, 2010
- 4) JCI 規準：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 JCI-S-002-2003
- 5) 竹山忠臣，大森慎也，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の寸法効果，第 65 回土木学会年次学術講演会概要集，V-528, pp. 1055-1056, 2010