

論文 繊維長と供試体寸法が繊維補強コンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響

守田 貴昭*1・仲野 弘識*2・内田 裕市*3

要旨：繊維長の長い繊維を用いた繊維補強コンクリートの材料試験の簡便化を目的とし、30mm と 60mm の鋼繊維と 30mm と 54mm の PP 繊維を使用し、100×100×400mm の標準曲げ供試体と寸法を 200×200×800mm とした供試体を用いて曲げ試験を行った。試験の結果、繊維長が 30mm の場合には繊維の種類にかかわらず供試体寸法による引張軟化特性の差は見られなかった。一方、60mm の鋼繊維では 100×100×400mm 供試体の方が引張応力が高くなり、54mm の PP 繊維の場合には 200×200×800mm 供試体の方が引張応力が高くなった。

キーワード：繊維補強コンクリート、短繊維、曲げ試験、寸法効果、繊維長

1. はじめに

通常の繊維補強コンクリートにおいては、繊維長のより長い繊維を用いた方が引張強度、靱性などの力学特性が向上することが経験的に知られている。しかしながら、長い繊維を用いるとフレッシュ性状ならびに施工性が低下するため、我が国では土間コンクリートなどを除き、繊維長が 30mm 程度以下の繊維が一般的に用いられている。一方、海外においては当然のことながら設計、施工条件にも依るが、50mm 以上の繊維も有効に利用されている¹⁾。

長い繊維を用いる場合の課題としては、フレッシュ性状ならびに施工性の問題の他に材料試験の問題がある。すなわち、一般に繊維補強コンクリートの材料特性試験には曲げ試験が行われるが、土木学会の規準によれば繊維長が 40mm を超える場合には曲げ供試体の断面寸法は 150×150mm とされている²⁾。そのため、供試体の重量は通常用いられている 100×100×400mm 曲げ供試体の重量の約 3 倍 (30kg 程度) となり、試験に要する労力は非常に大きくなる。さらに、一般に繊維補強コンクリートの曲げ特性は通常のコンクリートに比べばらつきが大きく、供試体数を多く要するためコンクリートの使用量もかなり多くなる。なお、ヨーロッパの規準では繊維長 60mm 以下の場合には、繊維長にかかわらず供試体の断面寸法は一律 150×150mm とされている^{3),4)}。

そこで、本研究では繊維補強コンクリートの材料試験の簡便化を検討するための基礎資料を得ることを目的として、繊維長 50mm 以上の繊維を対象として、これを敢えて 100×100×400mm の標準曲げ供試体で曲げ試験を行った場合に、得られる結果が断面寸法を繊維長の 3 倍以上とした供試体を用いて得られる結果とどの程度差

が生じるのかを確認することとした。また、曲げ試験結果から引張軟化曲線を推定する方法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は揖斐川産の川砂、粗骨材は揖斐川産の川砂利を使用した。繊維は鋼繊維とポリプロピレン繊維 (以下 PP 繊維) の 2 種類とした。混和剤には高性能減水剤と消泡剤を使用した。表-1 にコンクリートの配合を、表-2 に繊維の物性をそれぞれ示す。繊維の混入率は鋼繊維の場合は 1vol%、PP 繊維の場合は 0.75vol% とした。

2.2 供試体の作製

供試体寸法は、100×100×400mm (スパン 300mm) と 200×200×800mm (スパン 600mm) の 2 種類とした。混入する繊維は鋼繊維 (繊維長 30mm と 60mm)、PP 繊維 (繊維長 30mm と 54mm) の 4 種類とし、供試体寸法と繊維長の組合せごとにそれぞれ 5 本ずつ作製した。表-3 に供試体の一覧を示す。各コンクリートのスランプと空気量を表-4 に示すが、コンクリートの配合の影響を無くすために繊維長に関わらず同一の配合を用いたため、繊維長が長い場合には空気量とスランプの低下が見られた。

コンクリートの打込みは、供試体の長手方向の中央、左右の順にコンクリートを詰め込み、左右の部分のみに棒形振動機を挿入して締め固めた。打設後、材齢 2 日で脱型し、試験直前まで湿布養生を行った。切欠きはコンクリートカッターを使用し、長手方向中央に、断面高さの 0.3 倍の深さで設けた。

*1 岐阜大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

	単位量 (kg/m ³)					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	繊維	減水剤
鋼	195	336	1028	760	78.6	1.009
PP	195	336	1032	763	6.8	1.117

表-2 繊維の物性

	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)
鋼	30	0.62	1080
	60	0.75	1070
PP	30	1.40	585
	54	1.40	585

表-3 供試体諸元

	繊維長 (mm)	形状寸法 (mm)	本数
鋼	30	100×100×400	5
		200×200×800	
	60	100×100×400	
		200×200×800	
PP	30	100×100×400	
		200×200×800	
	54	100×100×400	
		200×200×800	

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

繊維	空気量 (%)	スランプ (mm)
鋼繊維30mm	7.6	7.7
鋼繊維60mm	4.1	3.9
PP繊維30mm	6.9	13.1
PP繊維54mm	4.0	3.8

2.3 圧縮試験

φ100×200mm の圧縮供試体を 1 条件あたり 5 本ずつ作製し、容量 2000kN の耐圧試験機を用いて試験を行った。

2.4 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は JCI 規準の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⁵⁾に準じて行

った。100×100×400mm 供試体の載荷試験は容量 100kN の精密万能試験機を使用した。荷重の計測は容量 100kN のロードセル、ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) の計測はクリップゲージ (測定範囲 5mm, 感度 1/1000mm) を供試体中央部の切欠きに差し込み計測を行った。載荷点変位の計測は変位計測治具に高感度変位計 (測定範囲 25mm, 感度 1/500mm) を取り付けて行った。200×200×800mm の供試体の載荷試験は梁試験機を使用した。荷重、CMOD および載荷点変位の計測は上記 100×100×400mm 供試体の場合と同一のものを使用した。載荷は不安定破壊を生じないように載荷バルブを手動で制御して行った。なお、載荷速度はいずれの供試体の場合も載荷開始からほぼ 10 分程度で載荷を終了するようにした。図-1 に 100×100×400mm 供試体の 3 点曲げ試験の概要を示す。

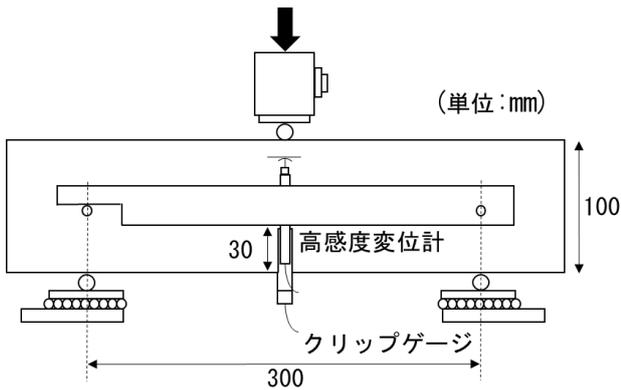


図-1 切欠きはりの3点曲げ試験

2.5 引張軟化曲線の推定

寸法の異なる曲げ供試体の試験の結果を直接比較することはできないため、3点曲げ試験で得られた荷重-荷重点変位-CMOD 関係から引張軟化曲線を推定することとした。本実験では引張軟化曲線の推定法として逆解析による方法⁵⁾と修正J積分法⁶⁾の2つを適用した。すなわち、逆解析による方法は軟化開始直後から推定可能であるが、開口変位が大きい領域において推定できなくなるという問題がある。一方、修正J積分法は数値解析を必要とせず、微分計算のみで推定可能であることか

ら大変位領域まで安定的に推定できるという特徴がある。そこで、本実験では軟化開始直後は逆解析により推定することとし、大変位領域では修正J積分法により引張軟化曲線を推定することとした。なお、修正J積分法ではCMODではなくひび割れ先端開口変位(CTOD)を計測する必要があるが、ここでは、リガメント部の変形モードを圧縮縁を回転中心とした剛体回転として、CTODとCMODの幾何学的関係からCMODを換算してCTODを求めた。また、CMODの計測に用いたクリップゲージの容量が5mmであるため、それを超える範囲では、幾何学的関係から荷重点変位を換算してCTODを求めた。図-2に荷重点変位、CTOD、CMODの幾何学的関係を示す。

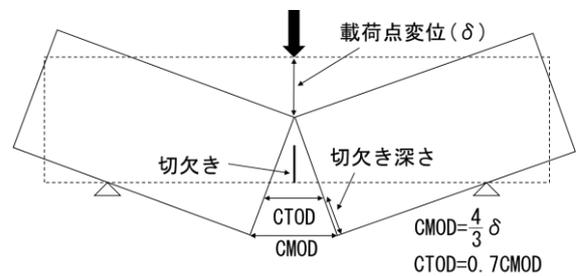


図-2 荷重点変位、CTOD、CMODの幾何学関係

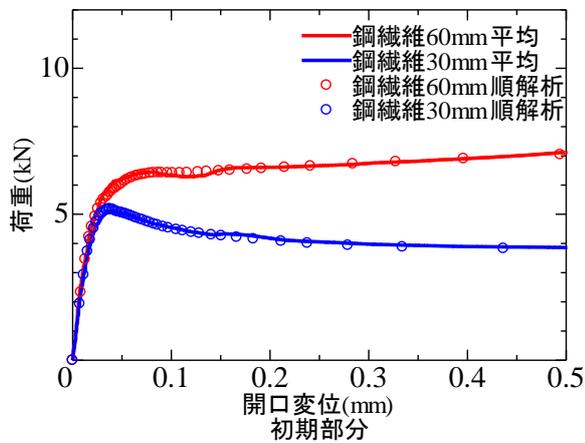


図-3 100×100×400mm 曲げ供試体(鋼繊維)の荷重-変位曲線

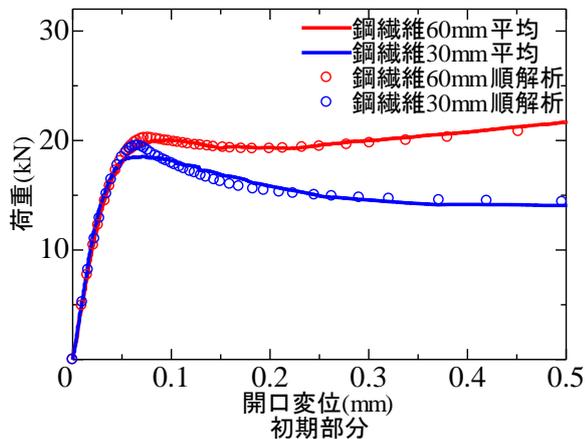
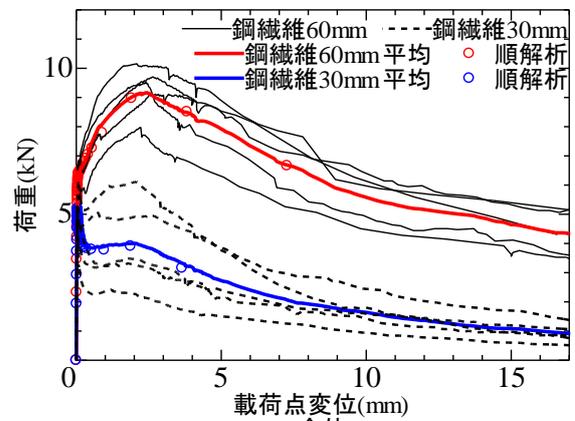
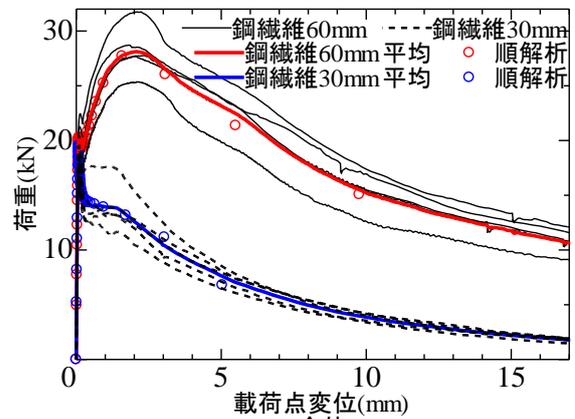


図-4 200×200×800mm 曲げ供試体(鋼繊維)の荷重-変位曲線



3. 実験結果

3.1 圧縮試験結果

圧縮試験結果を表-5に示す。PP 繊維の繊維長 54mm を用いた供試体のみ強度が低くなったが、その他の供試体ではほぼ同一の強度となった。

3.2 曲げ試験結果

曲げ試験により得られた結果を図-3 から図-6 に示す。また、図-3 から図-6 中には逆解析で得られた引張軟化曲線を用いて順解析を行った結果を併記した。図-3 と図-4 に示す 60mm の鋼繊維を混入した供試体の初

期部分を見ると、供試体寸法にかかわらず、ひび割れ発生後の荷重低下がほとんどなく、その他の繊維ではいずれも荷重が低下している。これは鋼繊維の弾性係数が高く、繊維長が 60mm と長いことで繊維とコンクリート間に十分な付着力が確保できているためと考えられる。繊維長の異なる同種の繊維の曲げ試験結果を比較すると、供試体寸法、繊維の種類を問わず繊維長が長い供試体は荷重が大きく、繊維長が長い方が有利であると考えられる。

表-6 には各供試体の変位 2.5mm 時の荷重のばらつき

表-6 変位 2.5mm 時の荷重

供試体寸法	繊維	荷重平均 (kN)	標準偏差 (kN)	変動係数
100 × 100 × 400	鋼30mm	4.00	1.32	0.33
	鋼60mm	9.02	0.79	0.09
	PP30mm	1.61	0.28	0.18
	PP54mm	2.54	0.87	0.34
200 × 200 × 800	鋼30mm	12.93	1.56	0.12
	鋼60mm	28.16	2.07	0.07
	PP30mm	5.95	1.01	0.17
	PP54mm	13.47	2.99	0.22

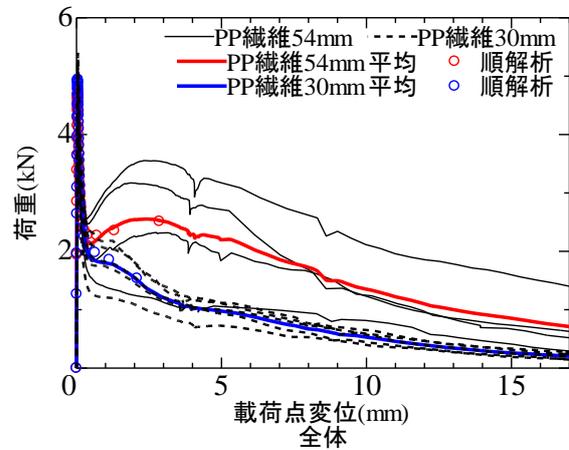
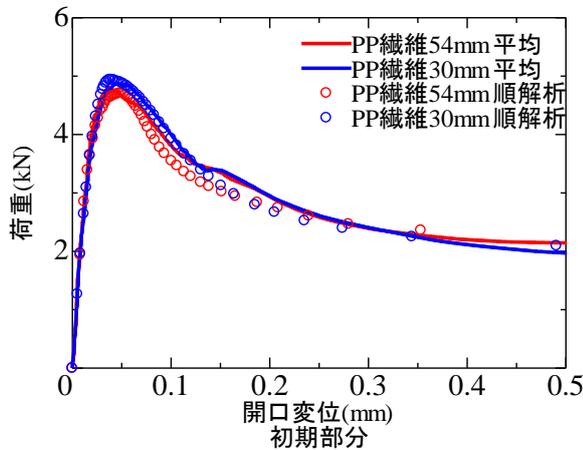


図-5 100 × 100 × 400mm 曲げ供試体 (PP 繊維) の荷重-変位曲線

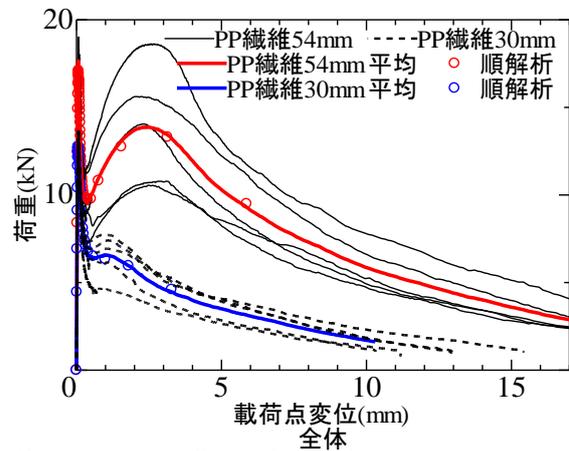
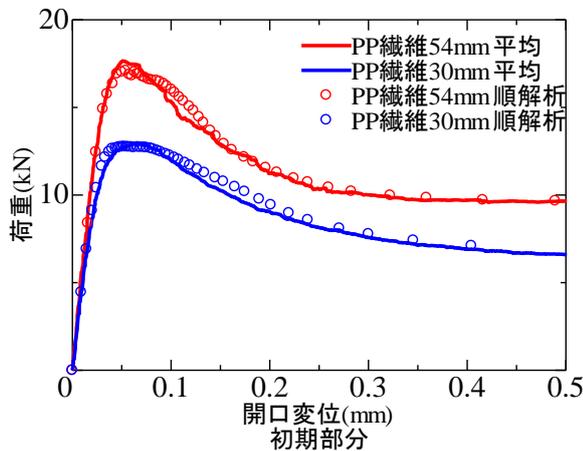


図-6 200 × 200 × 800mm 曲げ供試体 (PP 繊維) の荷重-変位曲線

表-5 圧縮強度

	繊維長 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)
鋼	30	47.0
	60	45.1
PP	30	44.9
	54	34.5

を示す。ここで変位 2.5mm は繊維長が長い場合の最大荷重点に相当する変位として選定したものである。同表ならびに荷重-変位曲線より、鋼繊維の場合には 100×100×400mm の供試体で繊維長 30mm の場合にばらつきが大きい結果となった。また、PP 繊維の場合には繊維長が長い場合にばらつきが大きくなる傾向が見られた。

4. 引張軟化曲線

逆解析と修正 J 積分法により得られた引張軟化曲線を 図-7 から 図-10 に示す。いずれの供試体においても、逆解析で求められた引張軟化曲線と修正 J 積分法で求められた曲線の重複区間は、部分的に一致しない箇所も見られたが、全体としてはほぼ同一の曲線となっている。2.5 節でも述べたように、ひび割れ幅 0~0.2mm 程度ま

での初期部分を逆解析による方法、それ以降を修正 J 積分法で推定した曲線を組み合わせることにより軟化直後から大変位領域まで連続した曲線を推定できることが示された。

繊維長が 30mm の場合、鋼繊維、PP 繊維とも 100×100×400mm 供試体の方が応力が若干高くなっているが、その差は比較的小さい。したがって、繊維長 30mm の場合には 100×100×400mm 供試体を用いて曲げ試験を行うことは妥当であると考えられる。一方、長い繊維を用いた場合、図-8 に示すように 60mm の鋼繊維の場合には、100×100×400mm 供試体の方が 200×200×800mm 供試体より 0.5N/mm² 程度応力が高くなっており供試体寸法の影響が明確に現れる結果となった。しかし、54mm の PP 繊維の場合には、鋼繊維と異なり開口変位が 1~3mm の範囲では 200×200×800mm 供試体の方が応力が高くなるという結果になっており、いわゆる寸法効果（寸法が大きいほど強度が低下する）の傾向とは逆の結果となった。以上のことより、本実験の範囲では、長さ 54mm ないし 60mm の繊維を用いた場合には、供試体の寸法効果が現れる可能性があることが示された。しかしながら、PP 繊維の場合には寸法効果が逆転する結果になっており、原因は明確ではないが、3.2 節でも述べた通り、試験結果のばらつきが影響している可能性があり、さらな

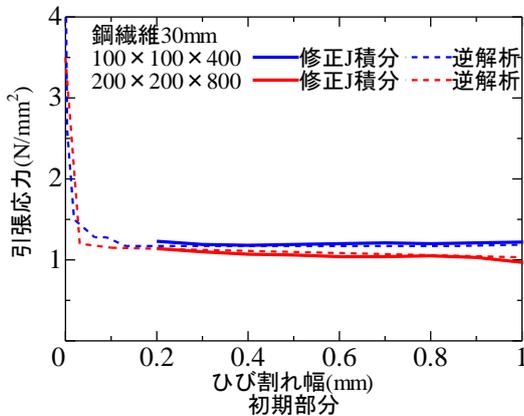


図-7 鋼繊維 30mm の引張軟化曲線

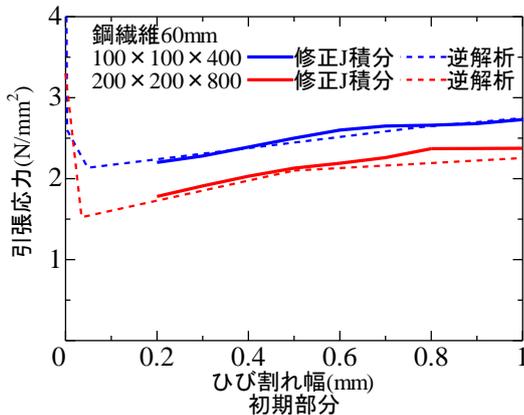
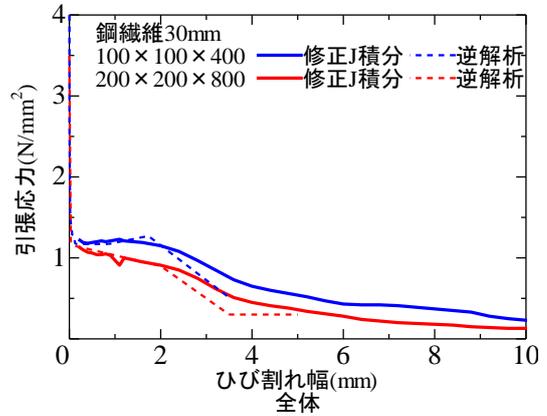
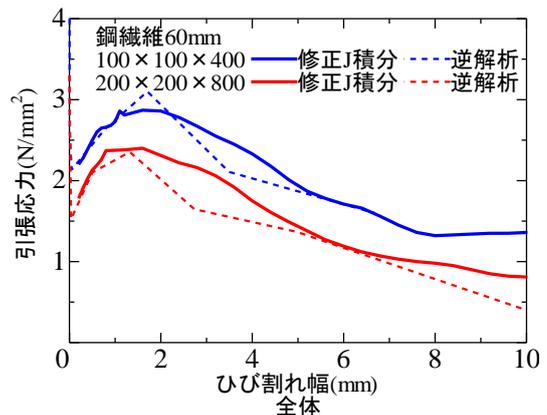


図-8 鋼繊維 60mm の引張軟化曲線



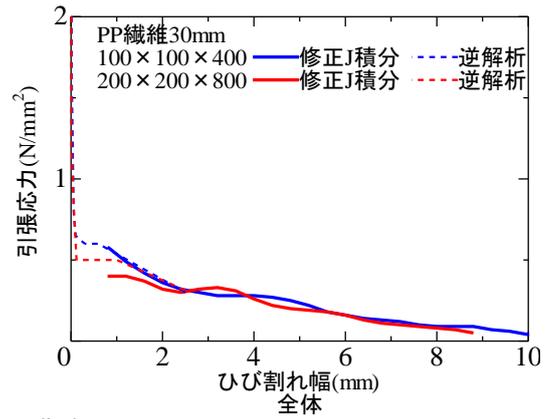
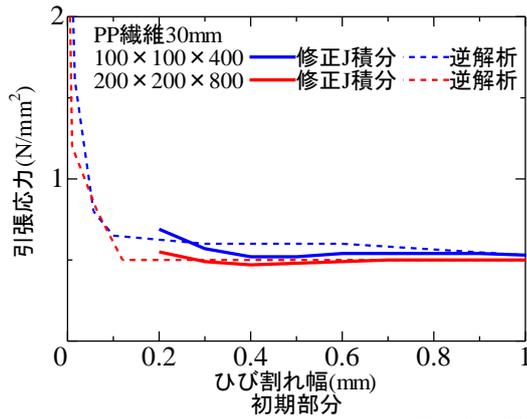


図-9 PP 繊維 30mm の引張軟化曲線

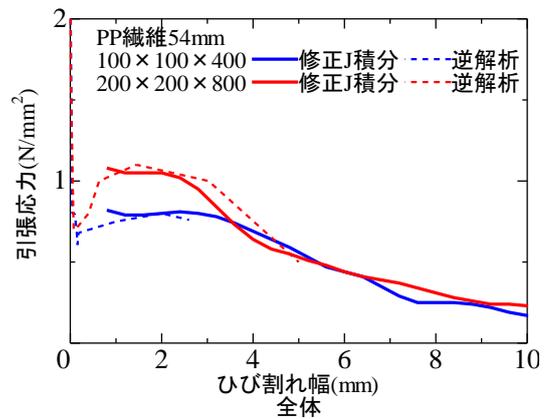
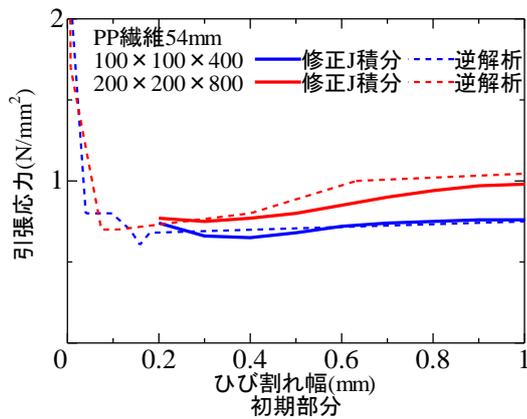


図-10 PP 繊維 54mm の引張軟化曲線

る試験が必要と考えている。

5. まとめ

- (1) 繊維長さ 30mm の場合と 54mm ないし 60mm の繊維を用いた場合を比較すると、長い繊維を用いた方が曲げ特性および引張軟化特性に対しては有利である。
- (2) 逆解析と修正 J 積分法を用いることで、軟化開始直後から大変位領域まで連続した滑らかな引張軟化曲線を推定することが可能である。
- (3) 繊維長さ 30mm の場合は、鋼繊維、PP 繊維とも曲げ供試体の寸法としては $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ でよいと考えられる。
- (4) 繊維長さ 54mm ないし 60mm の場合は、断面寸法 $100 \times 100\text{mm}$ と $200 \times 200\text{mm}$ では供試体寸法の影響が現れる可能性があり、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 例えば, S. Abbas, A.M. Soliman and M.L. Nehdi: Mechanical Performance of RC and SFRC Precast Tunnel Lining Segments: A Case Study, ACI Materials Journal,

Vol.111, No.5, pp.501-510, 2014

- 2) 土木学会：鋼繊維補強コンクリートの強度およびタフネス試験用供試体の作り方(案)(JSCE-F-552-2013), 土木学会コンクリート示方書[規準編], 2013
- 3) RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced Concrete, Materials and Structures, Vol.35, November, pp.579-582, 2002
- 4) EN 14651: Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2005
- 5) JCI 基準：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-001-2003
- 6) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 洽：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.203-212, 1991.2

謝辞

本研究に対しベカルトジャパン(株)ならびに BASF ジャパン(株)より繊維を提供していただきました。ここに記して感謝いたします。