

# 論文 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

川口 哲生<sup>\*1</sup>・片桐 誠<sup>\*2</sup>・白井 一義<sup>\*3</sup>

**要旨:** 超高強度繊維補強コンクリートを用いた部材の曲げ破壊性状を明確にするために、無筋はり、無筋板、RC板を対象に曲げ載荷試験を行った。無筋はりについては、試験体寸法を変化させて、曲げ強度の寸法依存性を把握し、引張応力-ひずみ関係の算定に必要な等価検長を算出した。次に、無筋板、RC板の曲げ試験では、破壊性状と耐荷力を把握した。また、UFCの等価検長と応力-ひずみ関係を考慮した降伏線理論の適用性について検証を行った。

**キーワード:** 超高強度繊維補強コンクリート、曲げ試験、寸法依存性、等価検長

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート<sup>1)</sup>(以下、UFCと略記)は、高強度の鋼繊維(以下、FM2.0%と略記)を含むため、高い引張強度、高い変形能力を有する材料である。これらの特性に起因して、極めて高いせん断抵抗力を有するため、UFC部材の設計においては、曲げ破壊に関する照査が重要と考えられる。つまり、UFC部材の設計をより合理化するためには、曲げ挙動を正確に把握して、ひび割れ発生限界または終局限界における耐荷力を精度良く推定することが重要と言える。UFCを部材に適用する際、メリットの1つは、優れた強度特性を活用して薄肉軽量化が図れることである。つまり、比較的小さく、かつ薄いUFC部材の曲げ挙動を把握し、精度良く推定する手法の整備が重要である。近年、土木学会から刊行された超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工(案)<sup>2)</sup>(以下、指針(案)と略記)では、比較的小さく薄い部材の設計に必要な特性値に関する記述は十分とは言えず、データの蓄積が必要と考えられる。

指針(案)におけるUFCの定義には該当しないが、PVA繊維を混入したケース(以下、FO3.0%と表記)も優れた性能を有する。しかし、その設計用値については、更なるデータの蓄積が必要である。例えば、FO3.0%のポストピーク領域を含めた圧縮応力-ひずみ関係や引張応力-ひずみ関係についてのデータは十分とは言えない。また、引張軟化曲線を引張応力-ひずみ関係に変換する際に必要な等価検長<sup>3)</sup>に関するデータは不足している。

UFC中には短繊維が存在するため、曲げ強度に関して、従来のコンクリートより強い寸法依存性が存在すると考えられる。また、押抜きせん断破壊に着目したUFCの板部材に関する研究はなされているが、板の曲げ挙動

に関する検討やデータも十分とは言えない。

以上の観点より、本研究ではFM2.0%、FO3.0%を用いたはり部材について、曲げ強度の寸法依存性の把握を図った。また、FO3.0%の引張軟化曲線と圧縮応力-ひずみ関係を把握し、等価検長の算定を行った。さらに、FM2.0%、FO3.0%を用いた板部材の曲げ試験を行い、曲げ破壊性状と耐力を把握した。また、板部材の終局耐力の算定手法として、事前に算出した等価検長と応力ひずみ関係を考慮した降伏線理論の適用性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表-1は、UFCの示方配合を示したものである。UFCは、セメント、シリカフューム、珪石微粉末などからなるプレミックス粉体と、水道水、高性能減水剤、短繊維により構成されるセメント系材料である。UFCは、自己充てん性を有しつつ、材料分離を防ぐため、高い粘性を有するように配合設計されている。練混ぜには容量100[l]の強制パン型ミキサーを用いた。高性能減水剤添加量を調整することにより、フロー値が260±10[mm]の範囲内になるように管理を行った。打設方法は、指針(案)<sup>2)</sup>に従い、試験体中央部から型枠に流し込んだ。短繊維の配向を抑えるために、流込み速度に注意した。ここでは、載荷面が打設面になるように流込みを行った。一次養生として、ポリ塩化ビニリデンフィルムで覆い、20[°C]24[hr.]の封緘養生を行った。その後最高温度を90[°C]として、48[hr.]保持する標準熱養生<sup>2)</sup>を行った。FM2.0%では、体積の2.0%に相当する短繊維を混入した。FO3.0%では、体積の3.0%に相当する短繊維を混入した。使用したPVA短繊維は、直径0.3[mm]、標準長15.0[mm]、引

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 工修 (正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 チームリーダー 工博 (正会員)

\*3 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 工博 (正会員)

表-1 UFCの示方配合

名称	水*	プレミクス粉体	鋼繊維	有機繊維	高性能減水剤
FM2.0%	180	2255	157	-	27
FO3.0%	178	2231	-	39	28

\*水は高性能減水剤を含む

表-2 試験水準 (シリーズ I)

UFC	試験体寸法 [mm]			
	高さ $H$	幅 $B$	長さ $L$	せん断スパン $a$
FM2.0%	30	30	120	30
	40	40	160	40
	50	50	200	50
FO3.0%	100	100	400	100
	150	150	600	150
	200	200	800	200

表-3 試験水準 (シリーズ II)

試験体名称	UFC	構造形式	試験体寸法 [mm]			荷重方法	鋼材種目
			幅×長さ	荷重スパン	厚さ		
FM-30	FM2.0%	無筋	700×700	600	30	4辺単純支持	—
60					—		
FM-60 SD		RC			60		D10 SD345
FM-60 HD					60		φ10 SBPDN
FO-30	FO3.0%	無筋	700×700	600	30	4辺単純支持	—
FO-60					60		—
FO-60 SD		RC			60		D10 SD345

張強度 900 [N/mm<sup>2</sup>]のものである。

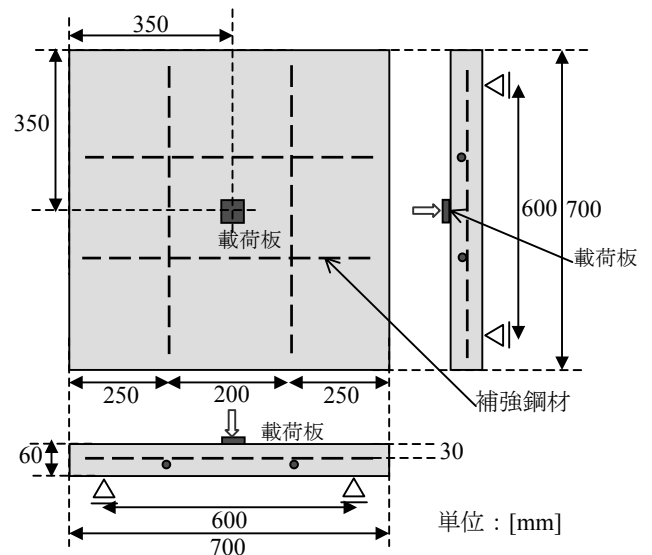
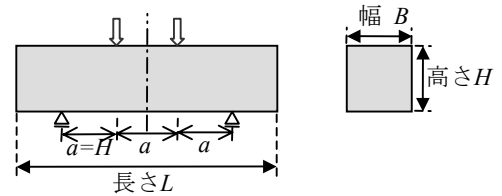
## 2.2 はりの曲げ試験

本研究では、寸法を変化させたはり部材の曲げ試験 (シリーズ I) と、板部材の曲げ試験 (シリーズ II) を行った。表-2 は、無筋はりの曲げ試験 (シリーズ I) における試験水準、図-1 (a) は、試験概要を示したものである。ここでは、短繊維種類と試験体寸法を試験水準とした。試験体は正方形断面を有するはり部材とした。試験体高さ $H$ と試験体長さ $L$ の比を 1:4 と一定にして、高さを 30~200 [mm]の間で 6 水準設定し、試験体寸法を相似的に変化した。荷重は 4 点曲げ試験とし、等モーメント区間長、せん断スパン長  $a$ 、試験体高さ  $H$ 、試験体幅  $B$  をそれぞれ等しくした。各水準における試験体数は 3 とした。荷重は万能耐圧機を用いて静的単調に荷重を行い、荷重速度は 10.0 [kN/min.]とした。支点は、ローラー支点とし、その直径は試験体寸法に併せて変化した。荷重は、耐圧機のロードセルより検出した。また、試験体下面にひずみゲージを貼り付け、ひび割れ発生を検知を行った。

同時に管理試験として、圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度の計測を行った。また、FO3.0%については、切欠きを有するはりの 3 点曲げ試験を行い、引張軟化曲線を算出した。

## 2.3 板の曲げ試験

試験水準は、短繊維種類、試験体厚さ、鋼材種目とした。表-3 はシリーズ II の試験水準を示したものである。対象とした UFC は FM2.0% と FO3.0%、構造は無筋構造、RC 構造である。試験体寸法は 700×700×30 or 60 [mm×mm×mm]とした。荷重スパンは 600 [mm]とし、4 辺単純支持とした。100×100×10 [mm]の荷重板を用いた。万能耐圧機を用いて、荷重速度は 5.0 [kN/min]として、静的単調に荷重試験を行った。荷重点直下の変位を、高感度



(b) シリーズ II (FM-60SD, FO-60SD)

図-1 試験概要

変位計を用いて、たわみを計測した。本研究では、既往の研究<sup>4), 5)</sup>を参考に、押抜きせん断破壊にはならず、曲げ破壊するように荷重スパン、支持条件、荷重板寸法を設定した。RC 構造を対象にした試験ケースでは、補強鋼材に異形鉄筋 (D10 SD345  $f_t=384$  [N/mm<sup>2</sup>]) を用いたケース (FM60-SD, FO60-SD)、細径異形 PC 鋼棒 ( $\phi 10$  SBPDN,  $f_t=1275$  [N/mm<sup>2</sup>]) を用いたケース (FM60-HD) とした。鋼材を配置した位置は、図-1 (b) に示す通りである。ここでは、かぶり厚さが 20 [mm]となるように鋼材位置を設定し、断面方向の鉄筋比は 0.34 [%]とした。荷重に際して、支点部のローラーと試験体の間にテフロンシートからなる減摩パッドを挿入し、支点による拘束を

表-4 強度試験結果

		圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	割裂引張強 度[N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]
シリー ズ I	FM 2.0%	218.6	10.84	53.0
	FO 3.0%	166.9	8.44	44.5
シリー ズ II	FM 2.0%	225.3	11.21	52.8
	FO 3.0%	171.2	8.91	45.2

表-5 試験結果 (シリーズ I)

名称	ひび割れ発 生荷重[kN]	最大荷 重[kN]	名称	ひび割れ発 生荷重[kN]	最大荷 重[kN]
FM-30	7.2	18.2	FO-30	6.7	30.4
FM-40	12.5	30.4	FO-40	9.9	40.9
FM-50	19.5	47.6	FO-50	15.5	50.5
FM-100	65.2	142.4	FO-100	41.9	100.2
FM-150	139.9	265.6	FO-150	104.6	150.1
FM-200	260.3	373.9	FO-200	177.8	200.9

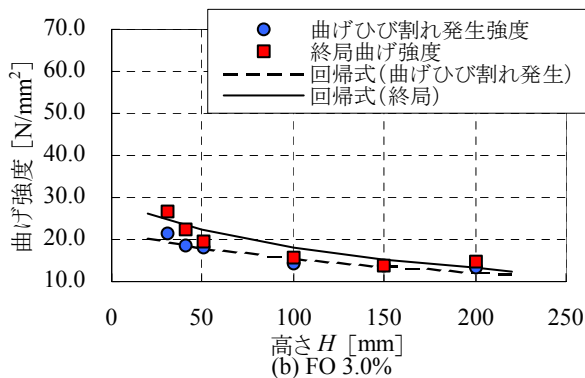
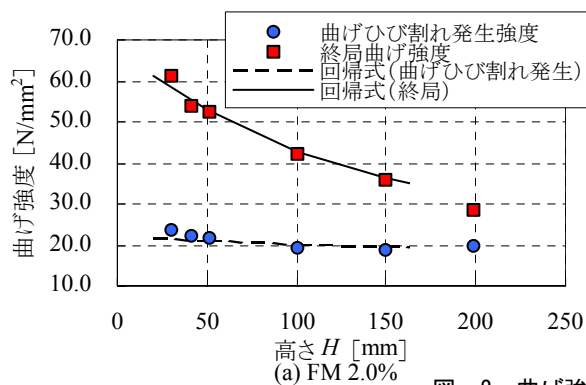


図-2 曲げ強度と試験体高さの関係

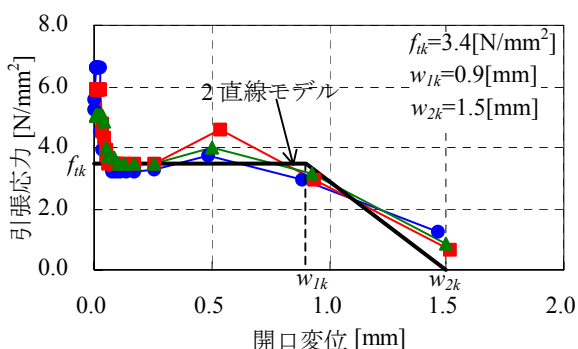


図-3 FO3.0%の引張軟化曲線

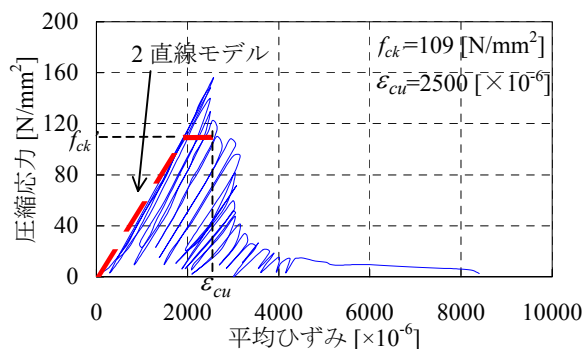


図-4 FO3.0%の圧縮応力-ひずみ関係

防いだ。

### 3. 実験結果

#### 3.1 はりの曲げ試験結果

表-4 は強度試験結果を示すものである。これより、全ケースにおいて、所定の圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数を有していることが確認された。表-5 は、シリーズ I より得られた試験結果を示すものであり、1 水準につき 3 体の試験体から得られた値の平均値である。

図-2は、曲げ強度と試験体高さの関係を示したものである。(a)はFM2.0%、(b)はFO3.0%について示したものである。曲げ強度は、曲げひび割れ発生強度と終局曲げ強度に区別した。ここで、終局曲げ強度は、最大荷重時のものである。UFCは、ひび割れ発生後も抵抗力を有するために、厳密に考慮すると弾性体ではなくなるが、ここでは簡略のため弾性体とみなして終局曲げ強度を求めた。(a)に示すFM2.0%のケースでは、曲げひび割れ発生強度、終局曲げ強度ともに寸法依存性が確認された。

表-6 曲げ強度の回帰分析結果

	FM2.0%		FO3.0%	
	曲げひび割 れ発生強度	終局曲げ 強度	曲げひび割 れ発生強度	終局曲げ 強度
a	200	100	400	280
b	10	1.5	20	10
c	100	100	220	180

特に、曲げひび割れ発生強度よりも、終局曲げ強度の方が高い寸法依存性を示した。これは、終局限界では、短繊維の架橋効果に起因する補強効果が強く影響を及ぼすため、高い寸法依存性が存在するものと考えられる。(b)に示すFO3.0%のケースでも、曲げひび割れ発生強度、終局曲げ強度ともに、寸法依存性が確認された。(a)と(b)を比較すると、PVA繊維よりも鋼繊維の方が終局曲げ強度に大きな影響を及ぼすことが確認された。ここで、FM2.0%、FO3.0%の曲げ強度について、回帰分析を行い、簡略化することで、(1)式を得ることができた。

$$f_b = 2 + \frac{a}{b + c(h/l_{ch})} \quad (1)$$

式中のa,b,cは表-6に表記。

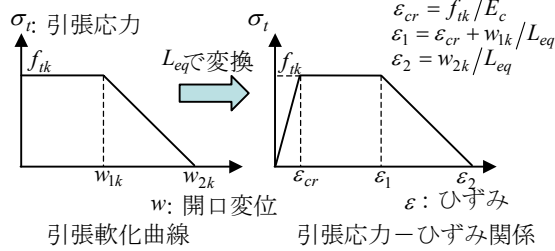


図-5 引張軟化曲線と引張応力-ひずみ関係

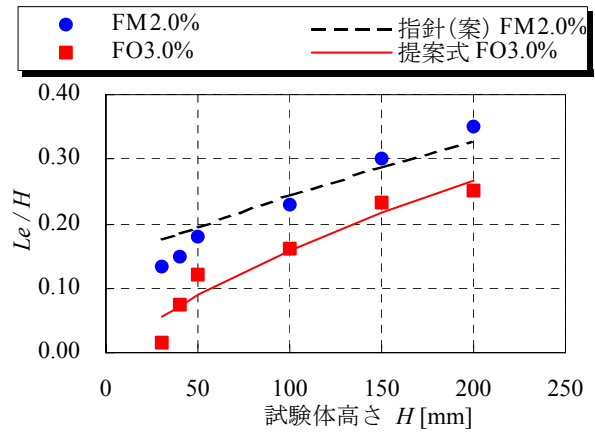


図-6 等価検長

表-7 試験結果 (シリーズII)

名称	ひび割れ発生荷重 [kN]	ひび割れ発生時 応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	最大荷重(実験値) [kN]	最大荷重時 応力度(実験値) [N/mm <sup>2</sup> ]	最大荷重(計算値) [kN]	破壊形態
FM-30	29.7	20.3	62.8	50.3	51.7	曲げ
FM-60	43.3	7.4	90.1	18.0	82.5	
FM-60 SD	58.5	10.0	124.4	24.9	105.9	
FM-60 HD	64.7	11.1	186.2	37.2	163.7	
FO-30	16.2	11.1	30.2	28.8	26.2	
FO-60	54.1	9.3	107.4	21.5	88.7	
FO-SD	48.4	8.3	106.0	21.2	94.9	

ただし、FM2.0%の特性長さは、指針(案)<sup>2)</sup>に示されるように、 $l_{ch}=1.06 \times 10^4$  [mm]を用いた。FO3.0%の特性長さは、ヤング係数のばらつきと後述する引張軟化特性を考慮して、 $l_{ch}=2.40 \times 10^3$  [mm]と定めた。

次に、FO3.0%を対象とした断面解析と等価検長を算定するために、FO3.0%の応力-ひずみ関係の把握を図った。そこで、引張軟化曲線と圧縮応力-ひずみ関係を算出した。図-3は、FO3.0%の引張軟化曲線を示したものである。「切欠きはりをを用いた繊維コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」<sup>6)</sup> (JCI-S-002-2003)を参考にして試験を行った。試験体は、 $100 \times 100 \times 400$  [mm]の角柱試験体で、角柱の軸方向中央部に深さ50 [mm]の切欠きを設けた。試験体数は3とした。JCIより配布されている逆解析プログラム<sup>6)</sup>を用いて、試験より得られた荷重と開口変位を用いて引張軟化曲線を算出した。数値計算や断面解析に適用する際には、図-3に示したように、引張軟化曲線を2直線モデルで簡略化して近似した。ここでは、実験より得られた引張軟化曲線の形状より、短繊維の架橋効果が、極めて高いと判断されたため、簡略化して2直線モデルとした。

図-4は、FO3.0%の圧縮応力-平均ひずみ関係を示したものである。荷重は万能耐圧機を用いて、くり返し荷重を行った。試験体には $\phi 50 \times 100$  [mm]の円柱試験体を

用いた。荷重に際して、高感度変位計を用いて試験体の変形量を計測し、荷重前の試験体の高さで除すことで平均ひずみを算出した。数値計算や断面解析に適用する際には、図-4に示したように、圧縮終局ひずみ $\epsilon_{cu}$ を $2500$  [ $\times 10^{-6}$ ]と仮定して、2直線モデルで近似した。

UFCを使用した部材を設計する際、引張特性を用いて構造解析を行うには、図-5に示すように、等価検長 $L_{eq}$ を用いて、引張軟化曲線を引張応力-ひずみ関係に換算する必要がある。田中ら<sup>3)</sup>は、FM2.0%のケースに対して、(2)式に示す等価検長 $L_{eq}$ の算定式を提案した。これはFEM解析結果と断面解析結果が等しくなるように算出したものである。本研究では、実験により得られた曲げ耐力と、応力-ひずみ関係より求めた曲げ耐力が同値となるように、新たに等価検長を定めた。FM2.0%については、指針(案)<sup>2)</sup>に示される応力-ひずみ関係を用いて、曲げ耐力の算出を行った。FO3.0%については、図-3、図-4に示すように、モデル化した応力-ひずみ関係を用いて、曲げ耐力の算出を行った。図-6は得られた $L_{eq}/H$ と試験体高さ $H$ の関係を示したものである。本研究で対象とした寸法範囲内でも、FM2.0%については、(2)式により概ね評価できることが確認された。また、FO3.0%について(3)式を得ることができた。

$$L_{eq}/H = 0.8 \times \left\{ 1 - 1 / (1.05 + 6H/l_{ch})^4 \right\} \quad (2)$$

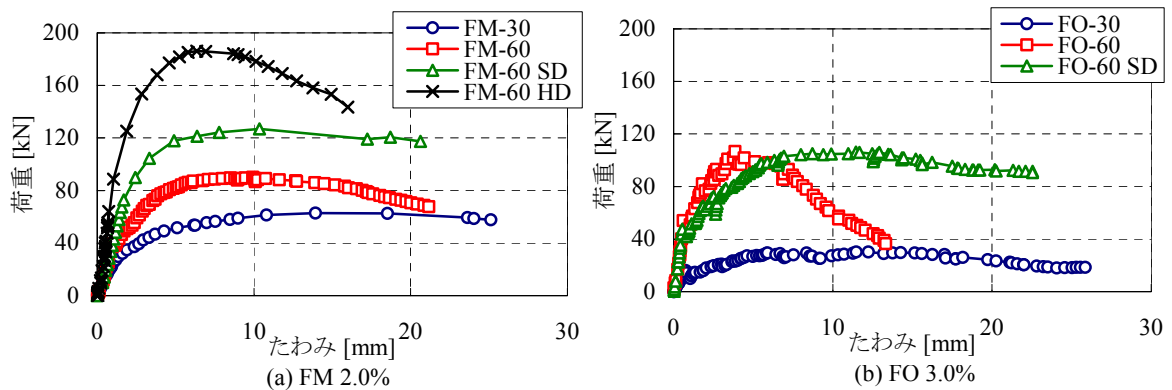


図-7 荷重-たわみ関係 (シリーズII)

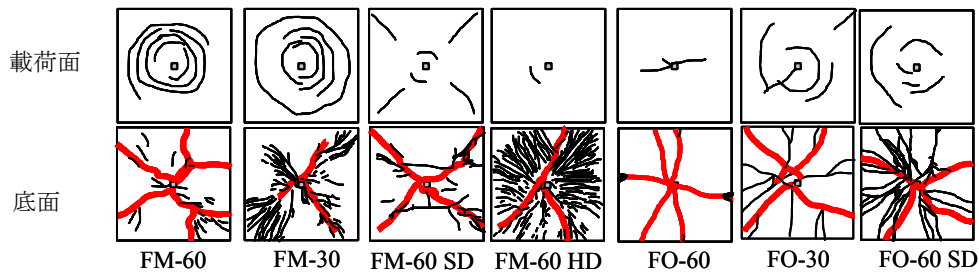


図-8 破壊性状 (シリーズII)

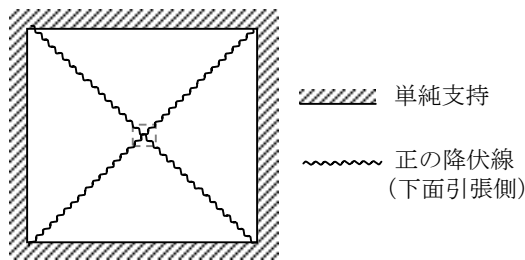


図-9 仮定した降伏線パターン

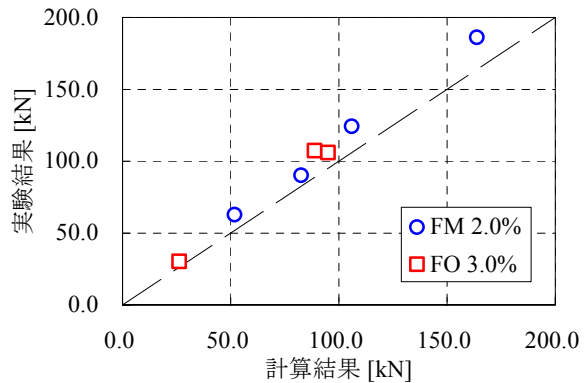


図-10 最大荷重の実験結果と計算結果 (シリーズII)

$$L_{eq}/H = 0.8 \times \left\{ 1 - 1 / (1 + 6H/l_{ch}) \right\} \quad (3)$$

ここに  $L_{eq}$ : 等価検長,  $H$ : 試験体高さ,  $l_{ch}$ : 特性長さ ( $=G_F E_c / f_{ik}^2$ ),  $G_F$ : 破壊エネルギー,  $E_c$ : ヤング係数,  $f_{ik}$ : 引張強度

### 3.2 板の曲げ試験結果

表-7 はシリーズIIの試験結果を示したものである。ここで、ひび割れ発生時応力度、最大荷重時応力度は、実験値を用いて弾性板理論<sup>7)</sup>と平面保持の仮定から算出した板の上下縁直応力である。また、最大荷重の計算値は、鉄筋コンクリートスラブの最大(崩壊)荷重を半経験的に算定する降伏線理論<sup>5),7)</sup>により算定した値である。

図-7 はシリーズIIから得られた荷重-たわみ関係を示したものである。(a)は、FM2.0%, (b)はFO3.0%のシリーズを示したものである。全てのケースにおいて、最大

荷重以降で急激に耐力を失わず、延性的に破壊に至ることが確認された。つまり、本研究の載荷条件では、FM2.0%, FO3.0%に関わらず、曲げ破壊に至ると判断される。図-7(a)において、無筋板 (FM-30, FM-60) と RC 板 (FM-60 SD, FM-60 HD) を比較すると、鋼材を用いた方が、最大荷重が大幅に向上しており、鋼材による補強効果が確認された。しかし、FM-60 HD のケースでは、最大荷重以降のポストピーク領域において、他のケースに比べて荷重が低下することが確認された。また、FM-30 と FM-60 を比較すると、FM-60 の最大荷重は FM-30 の 1.5 倍程度に留まっており、試験体厚さには比例していなかった。

次に図-7(b)において、FO-30 と FO-60 の最大耐力を比較すると、FO-60 の最大荷重は FO-30 のほぼ 2 倍となり FM2.0%とは異なる傾向が確認された。これは、鋼織

維の補強効果が PVA 繊維に比べて強いいため、FM2.0%では耐荷力に大きな寸法依存性が存在したためと考えられる。また、FO-60 と FO-60 SD を比較すると、最大荷重はほとんど等しいが、ポストピーク挙動が大きく異なることが確認される。つまり、FO3.0%では、鋼材による補強は、最大荷重には、ほとんど寄与していないが、最大荷重以降の変形能力の向上には寄与することが確認された。

図-8 は破壊性状を示したものである。全ケースにおいて、巨視的なひび割れが発生し終局に至ったことが確認された。目視観察の結果、ひび割れ幅が 10[mm]以上開口しており(図-8、太線部)、短繊維の補強効果が高いことが確認された。また、FM-60 と FM-30 は類似した破壊性状であったが、RC 版(FM-60 SD, FM-60 HD)と比べると、破壊性状は異なった。

図-9 は、降伏線理論を用いて、終局耐力の算定時に仮定した降伏線パターンを示したものである。これは、4 辺単純支持された RC 版の一般的な降伏パターンであり、本研究における試験体の破壊性状も概ね類似していることから、本パターン図を用いることにした。

図-10 はシリーズ II で得られた、UFC 板の最大荷重について、実験結果と計算結果の関係を示したものである。降伏線理論により最大(崩壊)荷重を算定する際、図-9 に示すように降伏線を仮定した場合、4 辺支持板の最大(崩壊)荷重は(4)式より得られる。

$$P' = 8m \quad (4)$$

ここで、 $P'$ : 崩壊荷重、 $m$ : 単位幅当りの塑性モーメント

ここでは、単位幅当りの塑性モーメントの算出に際し、FM2.0%のシリーズでは、指針(案)<sup>2)</sup>に示される応力-ひずみ関係と(2)式に示す等価検長を用いた。鋼材を配置したケースでは、鋼材の影響を組み込んで、単位幅当りの塑性モーメントを算出した。FO3.0%のケースでは、図-4の圧縮応力-ひずみ関係、図-3の引張軟化曲線と(3)式に示す等価検長を用いて算出した。図-10より、実験値は計算値の110~120%程度になることがわかる。実験値は計算値を上回るが、安全側に評価できており、ここでの計算精度は概ね良好であると考えられる。つまり、本研究の範囲では、FM2.0%、FO3.0%に関わらず、UFCの応力-ひずみ関係と等価検長を適切に考慮することで、計算精度の向上が可能となることが確認された。

#### 4. 結論

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

(1)寸法を変化させた UFC はりの曲げ試験を行い、曲げひび割れ発生強度と終局曲げ強度に関する寸法依存性を把握した。FO3.0%と比べて、FM2.0%の方では、寸法依存性が強く、試験体高さ 100mm 以下の領域で強い寸法依存性が存在することが確認された。また、本研究で設定した寸法範囲内では、曲げひび割れ発生強度と比較して、終局曲げ強度は大きな値を示しており、短繊維がひび割れ発生以降の引張り負担に大きく寄与していることが確認された。

(2)FO3.0%の圧縮応力-ひずみ関係、FO3.0%の引張軟化曲線を把握した。また、寸法を変化させたはりの曲げ試験結果に基づき、FO3.0%の等価検長算定式を導出した。

(3)FM2.0%、FO3.0%について、無筋板、RC 板の破壊性状を把握した。また、UFC の応力-ひずみ関係と等価検長を考慮した降伏線理論に適用することで、概ね良好な精度で耐荷力を推定できることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 佐川康貴, 松下博通, 鶴田浩章, 下山善秀: 鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.199-204, 2001.6
- 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), コンクリートライブラリーNo.113, 2004.9
- 3) 田中良弘, 福浦尚之, 鶴沢哲史, 坂本 淳, 前堀伸平, 片桐 誠: 超高強度繊維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化, 土木学会論文集, No.788/V-67, pp.159-173, 2005.5
- 4) 千明英祐, 二羽淳一郎, 田中良弘, 片桐誠: UFC パネルの押抜きせん断抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1741-1746, 2007.7
- 5) 趙唯堅, 小尾博俊, 加納宏一, 田中良弘: 超高強度繊維補強コンクリート薄板の曲げ・せん断特性に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第 18 巻第 2 号, pp.21-pp.33, 2007.5
- 6) [http://www.jci-web.jp/jci\\_standard/kitsutaka\\_dl.html](http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html)
- 7) 土木学会: 新体系土木工学 32 鉄筋コンクリートの力学, pp.220-241