

論文 超高強度繊維補強コンクリートの打設方法が薄肉部材の曲げ性能に影響する因子について

横尾 彰彦*1・奥山 厚志*2・松尾 久幸*3・原田 益宏*4

要旨: 超高強度繊維補強コンクリートを埋設型枠や補修部材に適用する場合、厚さ 10mm 程度の薄肉化が可能である。しかし、部材厚が薄くなるほど、鋼繊維の配向は 3 次元から 2 次元配置に変化し、鋼繊維の分散および沈下状況は、打設方法によって影響されるものと考えられる。また、鋼繊維の配向と分散は、部材の曲げ性能に影響をもたらすが、その程度を数値的に評価する方法は確立されていないのが現状である。本研究は、UFC 薄肉部材の打設方法、部材厚さ、ならびに載荷方向などの因子が、曲げ性能に及ぼす影響を実験によって確認するとともに、鋼繊維の配向を画像解析により数値化し評価する方法を試みた。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート、鋼繊維、曲げ強度、配向、画像解析、打設方法、部材厚（さ）

1. はじめに

近年開発された超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と略す）は、プレミックス粉体、鋼繊維、高性能減水剤等から構成されるセメント質複合材で、圧縮強度 180N/mm²以上の超高強度ならびに高靱性を有している。また UFC は、強度特性だけでなく、自己充填性、耐久性、耐磨耗性、耐凍結融解性などの優れた特性を備えた新素材であることから、埋設型枠や補修部材に適用する場合、厚さ 10mm 程度の薄肉化が可能である。筆者らは、UFC を用いた薄肉 PCa 部材を水路構造物の補修・補強向け材料として提案し、粗度係数の測定、薄肉化する場合の製造方法ならびに施工方法等を開発するとともに、これらの成果をもとに実構造物への適用を図ってきた^{1~4)}。

しかし、UFC は部材厚さが薄くなるほど鋼繊維の配向は 3 次元から 2 次元配置に変化し、鋼繊維の分散および沈下状況は打設方法によって影響されるため、部材厚さを薄くすることによる基礎性状への影響については未解明な点が存在する。さらに、品質のバラツキを少なくするための製造方法の追求も不可欠と考えられる。一方、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）」⁵⁾（以下、UFC 指針と略す）では、UFC の打設方法が鋼繊維の分散と配向に影響することを考慮して適切な打設方法を決定する必要があると記述している。しかしながら、鋼繊維の配向と分散の程度を数値的に評価する方法は確立されていないのが現状である。

以上のことより、本研究は、UFC 薄肉部材の打設方法、部材厚さ、ならびに載荷方向（載荷面を打設面とする正曲げ、ならびに型枠面とする負曲げ）などの因子が曲げ性能に及ぼす影響について試験し、あわせて鋼繊維の配

向を画像解析により数値化し評価する方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) UFC の示方配合

UFC は、セメントを基材として、珪砂、反応性微粉末などから構成されたプレミックス粉体と水道水、高性能減水剤、鋼繊維により構成されるセメント系材料である。表-1 に UFC の示方配合を示す。

練混ぜは、水平 2 軸強制練りミキサ（容量 100 リットル）を用い、1 回の練混ぜ（量）は 60 リットルとした。練混ぜ方法は、結合材をミキサに入れ 30 秒間空練りし、水と高性能減水剤を入れ 10 分間、その後鋼繊維を投入し 3 分間の練混ぜを行った。また、フロー値が 260±10mm の範囲内になるように、練混ぜ時間を調整することにより、フロー値管理を行った。

表-1 UFC の示方配合

フロー値 (mm)	水*1 (kg)	結合材 (kg)	短繊維 (kg)	減水剤 (kg)
260±10	180	2254	157	25

*1: 水 180kg は減水剤を含む

(2) 供試体の製作方法

平打ち用型枠は内寸法で幅 100mm、長さ 400mm、厚さは 10、15、20、25、30、40、55、100mm、縦打ち用型枠は幅 100mm、長さ 400mm、厚さは 10、30、50、100mm で鋼製のものを使用した。

*1 ジオスター（株） 技術部技術開発チーム技術研究所 工修（正会員）

*2 ジオスター（株） 技術部技術開発チーム技術研究所 工修

*3 日本コンクリート工業（株） 技術開発部 博士（学術）（正会員）

*4 石田工業（株） 技術部

UFC の打設方法は、UFC 指針に準拠し、図-1 に示すように型枠の端部から一層で連続的に流し込みを行った。養生としては、脱型後に 90℃の蒸気養生を 48 時間行った。

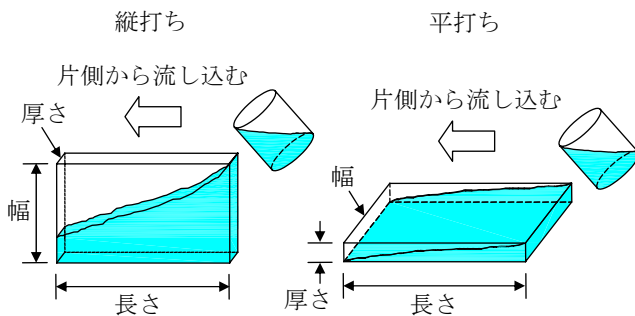


図-1 UFC の打設方法

2.2 曲げ試験

表-2 試験条件

打設方法	供試体形状 (mm)			荷重方向
	幅×長さ	スパン	高さ	
平打ち	100×400	300	10	正・負*1
			15	
			20	
			25	
			30	
			35	
			40	
			45	
			55	
			100	
	40×160	120	40	
縦打ち	100×400	300	10	側*2
			30	
			50	
			100	

*1：荷重方向の正は打設面を上縁，負は打設面を下縁。

*2：荷重方向の側は打設面を側面。

本実験では、打設方法、供試体形状および荷重方向を試験条件とし、表-2 の試験条件で曲げ試験を行った。ここで、供試体形状は幅 100mm×長さ 400mm を一定にし、供試体厚さを変化させた水準設定と寸法効果の影響を確認するために 40×40×160mm の形状を入れた合計 16 水準とした。各水準における供試体数は、平打ちの正曲げで 3、負曲げで 3、縦打ちで 5 とした。試験方法は、UFC 指針に準じた図-2 に示す 3 等分点曲げ荷重を行った。計測項目は、ロードセルによる荷重、供試体引張縁のひずみおよびスパン中央のたわみとした。

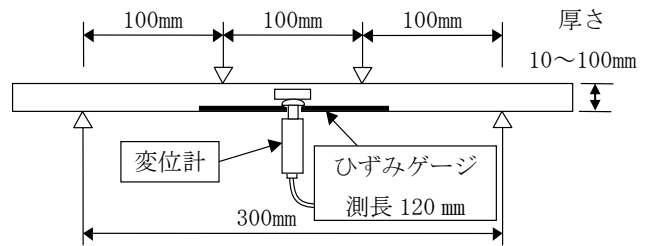


図-2 試験概要

2.3 鋼繊維の分布測定

鋼繊維の分布測定の供試体は、曲げ試験後の供試体を使用し、測定断面は支点部をコンクリートカッターで切断し、1 供試体に対し 2 断面とした。

分布測定は、各供試体の切断面の写真をコンピュータに取り込み、画像解析により測定した。画像処理に先立ち、切断面における鋼繊維部とコンクリート部のコントラストが明瞭に区別できるように、オイルを塗布し、コンクリート部を湿潤した。

切断面の表面処理後、垂直方向から写真を撮影し、図-3 に示すように画像編集ソフトで画像の修正・編集を行った。画像解析には、画像解析ソフト NIH 社 Scion Image を使用し、画像解析では切断面の鋼繊維を円に換算し、表-3 に示すように鋼繊維の面積と図心の X、Y 座標を測定した。また、表計算ソフトを用いて、切断面における配向係数、鋼繊維の面積比率および中心軸に対する鋼繊維全体の偏心率を計算した。



図-3 画像の処理・編集

表-3 画像解析データの例

鋼繊維 番号 (No.)	鋼繊維 面積 (mm ²)	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)
1	0.06	31.83	23.20
2	0.09	11.98	23.95
3	0.21	74.00	23.97
4	0.49	26.47	24.34
5	0.21	40.12	24.19
6	0.12	6.24	24.42
7	0.21	31.69	24.32
⋮	⋮	⋮	⋮

表-4 曲げ試験結果一覧

試験体形状 (mm)		強度 (N/mm ²)					
		正曲げ		負曲げ		側面	
幅×長さ	厚さ	ひび割れ強度	曲げ強度	ひび割れ強度	曲げ強度	ひび割れ強度	曲げ強度
100×400	10	18.7	46.7	16.8	33.1	13.5	23.6
	15	21.0	44.7	18.6	34.6	—	—
	20	24.4	49.5	18.4	38.4	—	—
	25	24.1	49.2	20.1	39.1	—	—
	30	25.6	47.7	22.9	33.8	12.1	30.5
	35	15.8	40.2	19.1	31.4	—	—
	40	20.9	41.2	17.1	34.6	—	—
	45	18.3	45.3	14.4	33.3	—	—
	50	—	—	—	—	14.5	30.8
	55	20.2	40.4	18.7	27.3	—	—
	100	19.1	37.7	19.0	30.7	17.0	34.7
40×160	40	17.8	51.5	16.2	30.8	16.9	39.5

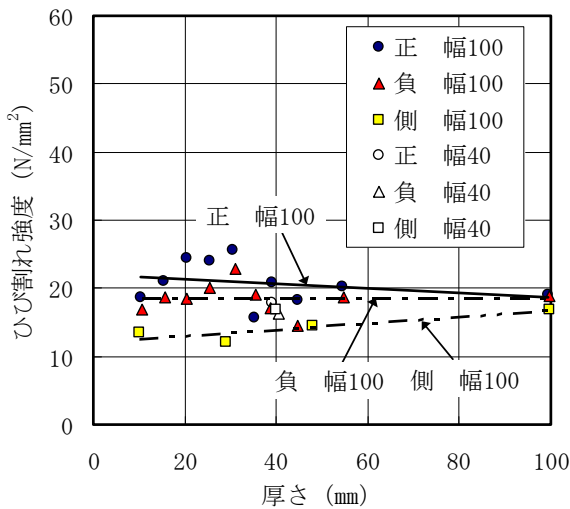


図-4 曲げひび割れ発生強度と供試体厚さの関係

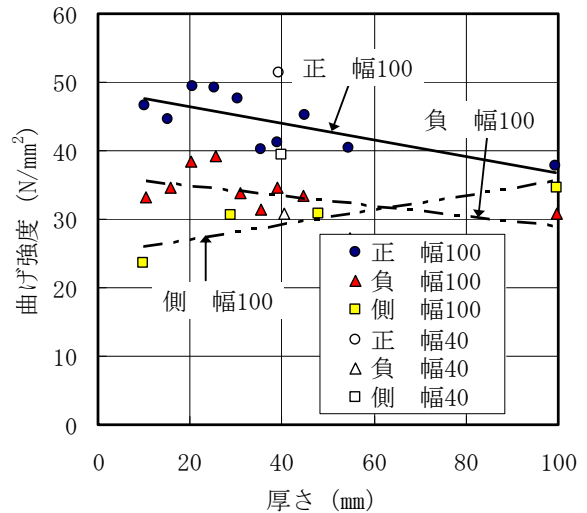


図-5 曲げ強度と供試体厚さの関係

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ試験

表-4 は曲げ試験結果一覧を示したものである。試験結果は、平打ちの正曲げ・負曲げは3体、縦打ち側面は5体の供試体より得られた値の平均値で示している。ひび割れ発生強度は、供試体の引張縁のひずみ測定により、測定値が不連続となった点をひび割れ発生荷重と特定した。また、曲げ強度は最大荷重時のものである。

図-4 はひび割れ発生強度と供試体厚さの関係を示したものである。ひび割れ強度は、平打ちの正曲げ、負曲げ、縦打ちの順で強度差が確認されたが、供試体厚さによる強度差は認められなかった。

図-5 は曲げ強度と供試体厚さの関係を示したものである。平打ちによる供試体は、厚さが薄くなるほど強度

が増加する傾向を示した。また、正曲げ・負曲げを比較すると、ほぼ同様の傾きを示したが、正曲げに対し、負曲げの強度は、73～79%で約25%程度の強度低下が確認された。これは、供試体厚さ方向の鋼繊維の沈下量が影響したものと考えられる。一方、縦打ちの場合には、厚さが薄くなると、強度が低下する傾向にあった。また、強度比較については、厚さ100mmの条件を除き、負曲げより低い結果であった。これは、UFCでは流れる方向にそって鋼繊維が分布することから打設方法の違いが影響したものと考えられる。平打ちと比較して曲げが作用する断面に対して斜めの鋼繊維が多くなり直角方向の鋼繊維量が少なくなったことと鋼繊維の沈下方向が供試体幅方向で、幅方向の鋼繊維の偏りが生じたことに起因するものと考えられる。

図-6 は荷重とたわみの関係を示したものである。各条件ともに、ひび割れ発生後に鋼繊維によって引張力が伝達され荷重が増加し最大荷重に達した後、耐力が漸減する傾向であった。供試体厚さを比較すると、厚さが薄くなるほど最大荷重のピークにおけるたわみ量が大きくなる傾向であった。また、平打ち正曲げ載荷では、他の2ケースと比較し、最大荷重のピークが鋭角になって顕著に表れた。これは、曲げ引張力に対して引張縁側に沈下した鋼繊維が有効に働いたためと推測される。

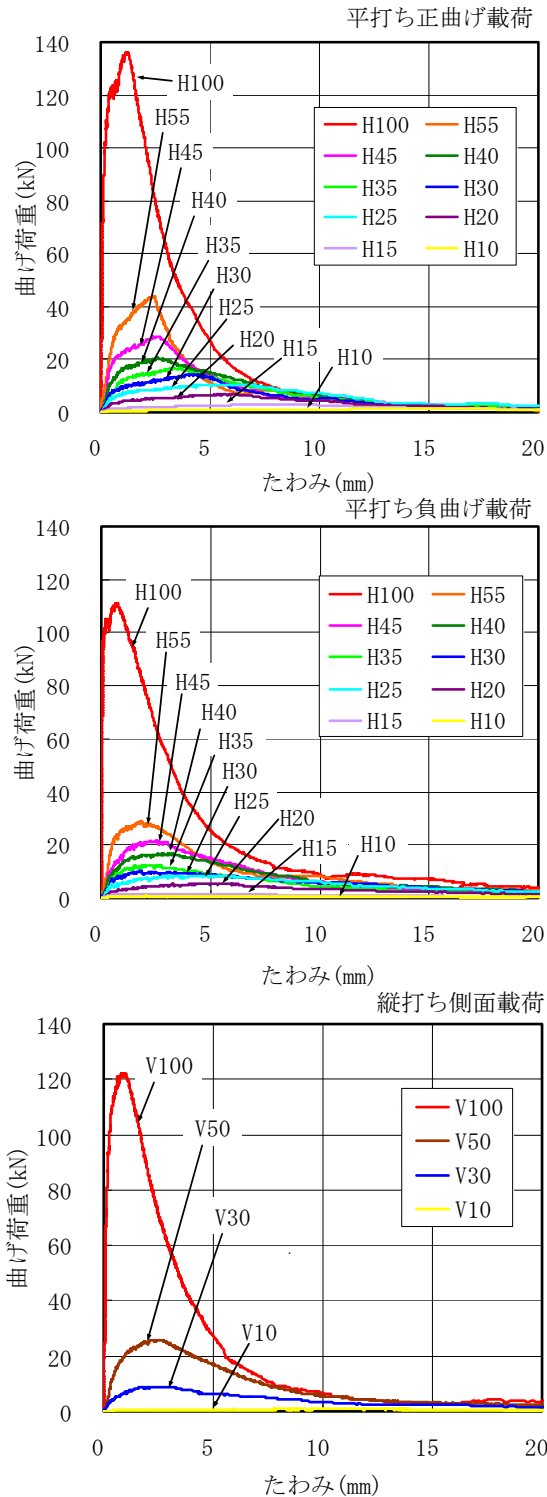


図-6 荷重とたわみの関係

表-5 は荷重とたわみの関係から(1)式により曲げじん性係数⁶⁾の算出結果を示したものである。

$$\bar{f}_b = \frac{T_b}{\delta_{ib}} \frac{\ell}{bh^2} \quad (1)$$

ここで、 \bar{f}_b : 曲げじん性係数 (N/mm²)

T_b : δ_{ib} までの面積 (N・mm)

δ_{ib} : スパンの 1/150 のたわみ (mm)

ℓ : スパン (mm)

b : 破断断面の幅 (mm)

h : 破断断面の高さ (mm)

表-5 曲げじん性係数

試験体形状 (mm)		曲げじん性係数 (N/mm ²)		
幅×長さ	厚さ	正曲げ	負曲げ	側面
100×400	10	14.55	12.55	11.15
	15	18.78	17.59	—
	20	24.00	20.16	—
	25	28.17	23.19	—
	30	28.16	23.84	20.17
	35	25.58	22.00	—
	40	28.74	24.31	—
	45	26.89	20.30	—
	50	—	—	22.45
	55	30.06	20.64	—
100	31.56	27.01	28.58	
40×160	40	28.14	17.45	23.29

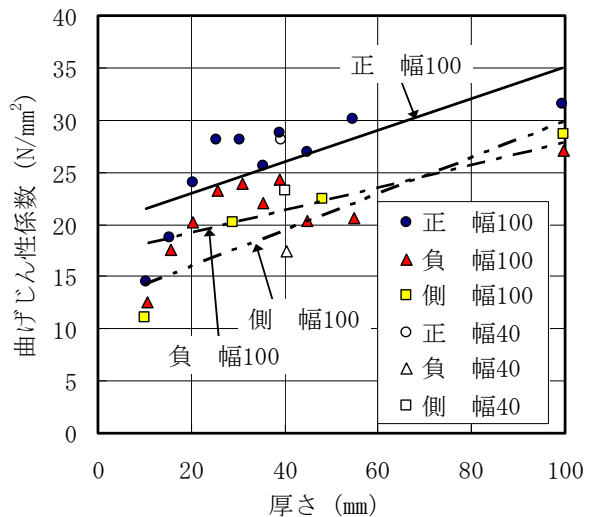


図-7 曲げじん性係数と供試体厚さの関係

表-6 画像解析による鋼繊維の分布一覧

試験体形状 (mm)		配向係数		鋼繊維の面積比率 (%)		鋼繊維の偏心率 (%)		
		平打ち	縦打ち	平打ち	縦打ち	平打ち		縦打ち
幅×長さ	厚さ					正曲げ	負曲げ	
100×400	10	0.513	0.401	7.6	6.2	-9.27	11.12	2.74
	15	0.491	—	7.4	—	-3.89	3.71	—
	20	0.510	—	7.5	—	-3.32	3.01	—
	25	0.457	—	8.2	—	-7.23	7.40	—
	30	0.452	0.393	8.3	9.3	-4.26	4.87	2.69
	35	0.441	—	9.2	—	-3.84	3.90	—
	40	0.394	—	9.7	—	-2.50	3.42	—
	45	0.410	—	8.6	—	-1.72	2.85	—
	50	—	0.371	—	9.3	—	—	5.04
	55	0.385	—	9.5	—	-2.42	1.39	—
	100	0.386	0.350	11.3	11.7	0.61	3.51	2.08
40×160	40	0.357	0.331	11.9	10.9	-3.57	5.45	0.48

図-7 は曲げじん性係数と供試体厚さの関係を示したものである。全体的に打設条件による差はあまりなく、供試体厚さ 25mm 以下では、打設条件に関わらず厚さが増えるに従って曲げじん性係数はほぼ直線の関係で増加するが、25mm を越えると曲げじん性係数は全体的には緩やかな増加傾向にあるものの、減少するケースも観察されている。供試体厚さ 25mm 以下の値が小さい理由は、せん断スパンと供試体厚さの比による部材の曲げ剛性の違いが影響していると考えられる。また、図-6 の最大荷重時のたわみ量を見ても、スパン 1/150 のたわみ量を越えており、(1)式より算出した曲げじん性係数は最大荷重前の値である。

3.2 鋼繊維の分布

表-6 は画像解析による鋼繊維の分布一覧を示すものであり、1 供試体に対し 2 断面の画像解析より得られた値の平均値を示す。

図-8 は配向係数と供試体厚さの関係を示したものである。図中には、配向係数の理論値を破線で示す。鋼繊維の配向係数を求める方法⁷⁾は、試験体の切断面の画像解析より鋼繊維本数を算出し、計測面積あたりの繊維本数を数えた鋼繊維密度 ρ と鋼繊維の断面積 a を用いて、切断面と直交方向の配向係数 β を(2)式で算出した。平打ちと縦打ちともに、供試体厚さが薄くなれば、配向係数が増加する傾向を示し、平打ちの場合、鋼繊維の配置が 3 次元から 2 次元ランダムに配置される傾向が高くなる事が確認された。

$$\beta = \rho \cdot \frac{a}{V_f} \quad (2)$$

ここで、 β : 配向係数, ρ : 鋼繊維密度 (本/mm²), a : 鋼繊維断面積 (mm²), V_f : 鋼繊維混入率 (vol.%)

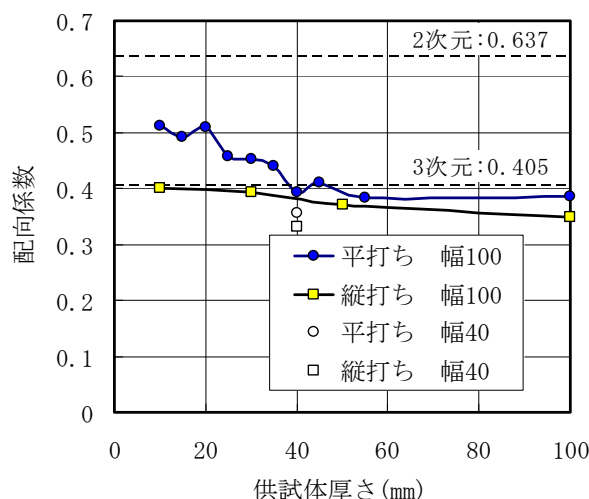


図-8 配向係数と供試体厚さの関係

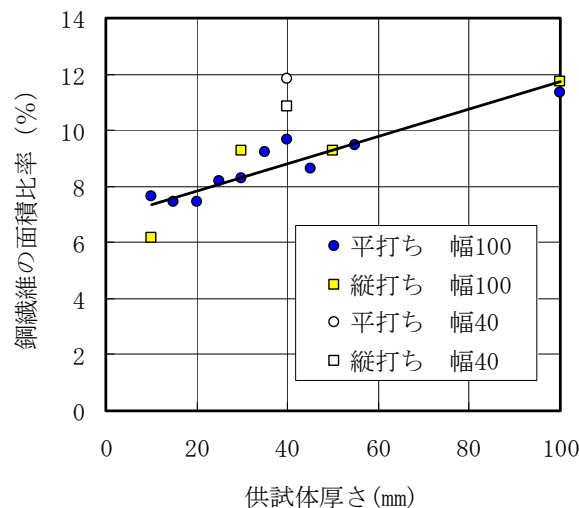


図-9 鋼繊維の面積比率と供試体厚さの関係

図-9 は計測断面に対する鋼繊維の面積比率と供試体厚さの関係を示したものである。鋼繊維の面積率は、画像解析で得られた鋼繊維面積を計測断面で除して算出した。図に示すように、平打ちと縦打ちの条件において、鋼繊維の面積比率と供試体厚さの関係は、同様な傾向を示し、鋼繊維の面積比率は厚さが薄くなるほどほぼ直線関係で減少している。鋼繊維の単位容積当たりの本数はほぼ等しいとして、厚さが薄い場合、鋼繊維はほぼ直角に切断されるのに対し、厚さが大きくなるほど、鋼繊維は斜めに切断されたり、繊維の長さ方向に沿って切断されるため、面積比率が大きくなっていると考えられる。これは、図-8 と同様で、部材厚さが薄くなるほど、鋼繊維の配向が3次元ランダムから2次元ランダムに移行することを示している。

図-10 は供試体厚さ中心軸に対する鋼繊維の偏心率と供試体厚さの関係を示したものである。鋼繊維の偏心率は、画像解析で得られた鋼繊維面積と座標位置から供試体中心軸に対する鋼繊維図心の偏心量を供試体厚さで除して算出した。なお、偏心量は計測断面の中心を原点とし、各鋼繊維の座標位置と面積によるx軸に対する断面一次モーメントを全鋼繊維面積で除したもので、偏心率の値がマイナスになるほど、鋼繊維は引張側に分布することを示している。図に示すように、縦打ちの側の場合、供試体の厚さに関わらず、鋼繊維の偏心率は上縁側で供試体厚さの2~5%の範囲内であった。一方、平打ちの正負の場合、全体的にデータのバラツキが見られるものの、対称的な傾向が見られ、供試体厚さ55mm以下の条件で、鋼繊維の偏心率は供試体厚さの2~10%程度となった。また、鋼繊維の偏心率と曲げ強度との関係については、強い相関関係があるものと予想されるが、データが不足しているため今後の課題とする。

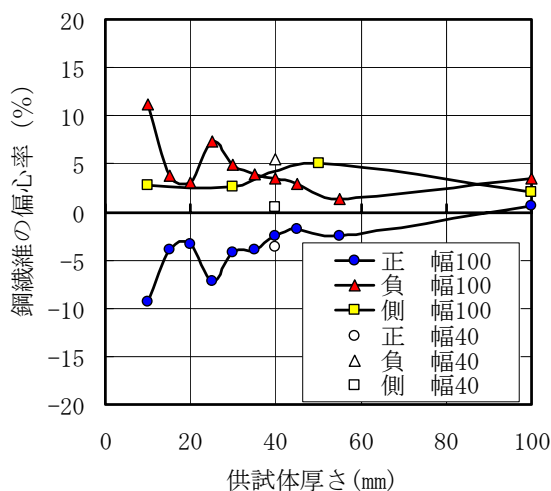


図-10 鋼繊維の偏心率と供試体厚さの関係

4. まとめ

本研究は、UFC 薄肉部材の打設方法、部材厚さ、ならびに載荷方向の因子が曲げ性能に及ぼす影響について試験し、あわせて鋼繊維の配向を画像解析により数値化し評価する方法について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 平打ちの供試体は供試体厚さが薄くなるなど強度が増加する傾向を示し、正曲げの強度に対し、負曲げの強度は、約 25%程度の強度低下が確認された。一方、縦打ちの条件は、厚さが薄くなると、強度が低下する傾向が確認された。よって、薄肉部材の曲げ性能は、打設方法や載荷方向に大きく影響することが確認された。
- (2) 曲げじん性係数については、打設方法や載荷方向にあまり影響しないことが確認された。また、本研究で設定した寸法では、供試体の厚さが 25mm 以下の範囲において、供試体厚さと曲げじん性係数との間に、ほぼ正の線形関係が見られた。
- (3) 供試体切断面の写真を画像解析する方法で、鋼繊維の配向係数、鋼繊維の面積比率、鋼繊維の偏心率を数値化することが可能であった。また、画像解析から、部材厚さが薄くなるほど、鋼繊維の配向は3次元ランダムから2次元ランダムに移行することが確認された。

参考文献

- 1) 水路トンネルの劣化対策, 日経コンストラクション, pp.38-39, 2005.8-26
- 2) 坂下雅司, 石川高志, 横尾彰彦, 片桐誠: 超高強度繊維補強コンクリート製品の水路トンネル補修工事への適用, コンクリート工学, 「プレキャストコンクリート製品の課題と展望」に関するシンポジウム, pp.53-58, 2008.2
- 3) 松岡彰博, 西場猛: 超高強度繊維補強コンクリートパネルによる水路トンネル補修, 農土誌, Vol.75, No.1, pp.29-30, 2007.1
- 4) 石川高志, 松尾久幸, 小野寺徹, 中谷郁夫, 横尾彰彦: UFC パネルを用いた水路トンネルの全断面補修事例, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, pp.637-638, 2007.9
- 5) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 土木学会, コンクリートライブラリー113, 2004.9
- 6) コンクリート標準示方書[規準編]2007 年制定, 土木学会, 2007.5
- 7) 小林一輔: 繊維補強コンクリートー特性と応用ー, オーム社, 1981