

# 論文 鋼繊維の形状が高流動・高強度繊維補強コンクリートに及ぼす影響

牛田 耕悟\*1・上原 匠\*2・梅原 秀哲\*3・深津 章文\*4

**要旨：**本研究では、鋼繊維の形状が高流動・高強度繊維補強コンクリートの物性に及ぼす影響の把握を目的に、同一断面形状で異なったフック形状を有する4種類の鋼繊維を用いて、形状の違いが高流動・高強度コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響について、実験結果をもとに検討した。実験結果から、フックの加工形状と混入する空気量との間に有意な関係が見られ、曲げ性能への効果も異なることが明らかとなった。

**キーワード：**繊維形状, 鋼繊維補強コンクリート, 空気量, 曲げ性能

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは、引張および曲げ強度などの強度特性の向上が可能となることに加え、靱性性能の付与によるひび割れ発生後の変形挙動が普通コンクリートと比較し格段に優れていることが利点として挙げられる。しかし、そのフレッシュ性状に関しては、施工性の低下が懸念されていることから、一般には利用しにくい構造材料となっているのが現状である。その改善策として、鋼繊維補強コンクリートの高流動化が試みられており、関連する研究が数多く報告されている<sup>1)</sup>。ところで近年では、コンクリート構造物の大型化、大スパン化、および耐用年数の長期化など、構造物自体の高性能化を目的に、高強度コンクリートの使用頻度が拡大される傾向にある。しかし、高強度コンクリートは、部材断面の縮小化が図れる一方、破壊性状が脆性的であるため、靱性性能の確保という点に関しては課題が残る。その改善策として、鋼繊維によって靱性性能を付与することが考えられるが、この場合、鋼繊維には加工形状の異なる多様な種類が存在することから、用途に応じた繊維の選定が重要になると言える。

そこで本研究では、施工性が高く高強度を有

する鋼繊維補強コンクリートを対象に、同一断面形状で異なったフック形状を有する鋼繊維を用いて実験を行い、繊維形状がコンクリートの物性に及ぼす影響をフレッシュおよび硬化の両面から把握し、形状が及ぼす影響を検討した。

## 2. 使用材料

表-1 に実験に使用した材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材は、東海地方で一般に使用されている材料である。図-1 に使用した鋼繊維の形状を、表-2 に機械的性質を示す。鋼繊維は、未加工のストレートが1種類、フック加工を施した繊維が4種類（フック-A：片振り（曲）、フック-B：両振り、フック-C：片振り（直）、フック-D：三波片振り）の合計5種類である。ストレ

表-1 使用材料

材料	記号	種類・性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：3390cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	豊田産山砂 密度：2.57g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率：2.67, 吸水率：1.55%
粗骨材	G	瀬戸産砕石（最大寸法20mm） 密度：2.73g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率：6.65, 吸水率：0.38%
混和剤	SP	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸基含有多元ポリマーを主成分
鋼繊維	S.F	密度：7.85g/cm <sup>3</sup> , 直径(d)：0.85mm, 長さ(L)：43mm 断面積：0.57mm <sup>2</sup> , アスペクト比(L/d)：50.6

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 (修) 工 (正会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻助教授 (博) 工 (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻教授 Ph.D. (正会員)

\*4 (株)ブリヂストン 土木海洋資材販売促進部 土木資材販売促進課 (非会員)

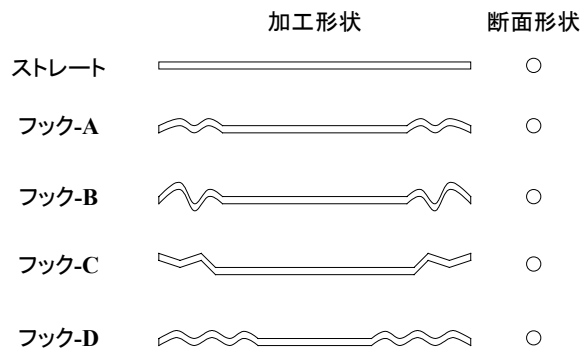


図-1 使用鋼繊維の形状

表-2 鋼繊維の機械的性質

シリーズ	繊維形状		引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
	加工	断面		
ストレート	無し	円形	1100	206
フック-A	片振り*(曲)			
フック-B	両振り**			
フック-C	片振り*(直)			
フック-D	三波片振り*			

\*印：片振りは繊維長手直角方向に対し，片側に形状加工

\*\*印：両振りは繊維長手直角方向に対し，両側に形状加工

表-3 高流動コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	SP (%)	S.F (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	SP	S.F
ベース	35	56	1.0	-	187	534	861	719	5.34	-
繊維混入				1.0	185	529	852	711	5.29	78.5

ートを除く繊維4種は，繊維同士が水溶性接着剤により結合されている。寸法は，全ての繊維において長さが43mm，直径が0.85mm，

アスペクト比(L/d)が約50.6である。なお，違いは加工形状のみで，他の条件は全て同じ繊維を用いた。

### 3. 実験概要

鋼繊維補強コンクリートの配合は，繊維未混入のベースコンクリートにおいて，材料分離が生じないことを確認した後，ベースコンクリートの配合が繊維混入に伴う各単位量の減量をもとに算定した。鋼繊維は容積混入率で1.0%とした。表-3に高流動コンクリートの配合を示す。ベースコンクリートの配合は，水セメント比35%，目標スランプフロー700mmの設定条件で，材料分離が生じないことを試験練りにより確認し決定した。空気量は4.5%に設定したが，練り上がったコンクリートに対しては，材料分離の有無だけに着目し，混和剤による調整は行わなかった。また，鋼繊維補強コンクリートに対しても，本実験では繊維形状に着目したため，混和剤によるフレッシュ性状の調整は行わなかった。練混ぜにはパン型強制練りミキサ(容量：50リットル)を使用し，モルタル，鋼繊維，粗骨材の順に投入し，全材料投入後60秒間練混ぜた。試験項目は，スランプフロー，空気量，圧縮強度，曲げ強度および曲げタフネスであり，表-4に示す試験方法に準拠して行

表-4 コンクリートの試験方法

試験項目	試験方法
スランプ フロー	JIS A 1150-2001 「コンクリートのスランプフロー試験方法」
空気量	JIS A 1128-1999 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験」
圧縮強度	JIS A 1108-1999 (φ100×200mm使用) 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
曲げ	JCI-SF4 (100×100×400mm使用) 「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」

った。なお，強度試験で使用した供試体は，標準水中養生28日を完了したものである。また，本実験では，繊維長が43mmの鋼繊維を使用しているが，土木学会<sup>2)</sup>が定める供試体寸法(圧縮：φ150×300mm，曲げ：150×150×530mm)ではなく，それぞれにφ100×200mmおよび100×100×400mmを使用している。これは，本実験で使用した鋼繊維が試作品であるため数量が限られていること，また，試験装置の都合によるものである。従って，これらの供試体を用いることにより，特に硬化後の物性において，寸法などによる影響が想定されるが，本研究では繊維のフック形状に着目しているため，規定とは異なる供試体寸法を用いても繊維の加工形状の影響は把握できると判断した。

## 4. 実験結果

### 4.1 フレッシュコンクリート

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

シリーズ	スランプフロー (mm)	スランプ (cm)	フロー時間 (秒)		空気量 (%)	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )
			500mm	最終		
ベース	730×720	28.0	3.9	39.7	2.6	2.37
ストレート	460×440	25.0	-	18.6	3.1	2.41
フック-A	630×620	28.0	4.2	44.4	1.9	2.44
フック-B	550×530	26.0	7.4	37.8	2.4	2.42
フック-C	590×550	24.0	5.1	29.0	3.6	2.38
フック-D	500×460	23.0	8.0	24.1	5.0	2.37

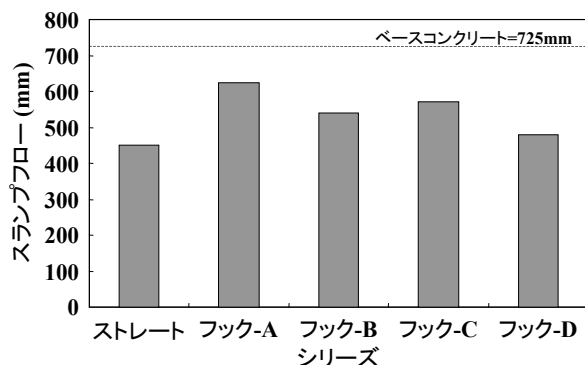


図-2 スランプフロー試験結果

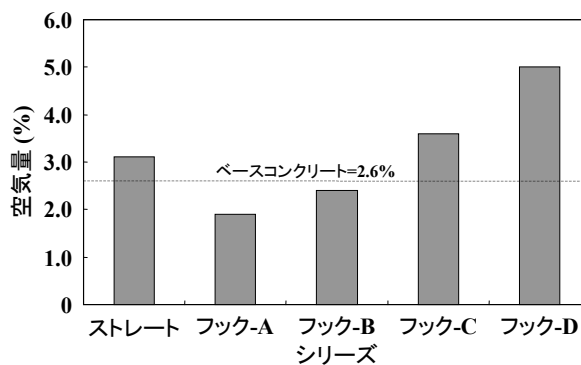


図-3 空気量試験結果

表-5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。ベースコンクリート（繊維未混入）のスランプフローは730×720mm、空気量は2.6%であった。鋼繊維を混入したコンクリートは、全てのシリーズにおいて、ファイバーボールおよび材料分離の発生は見られなかった。

#### (1) スランプフロー

図-2 にスランプフロー試験結果を示す。全体的に、繊維端部の波型が大きく、波数が増加するとスランプフローは減少していく傾向にあることがわかる。これは、フック-Dのようにフック形状が複雑な鋼繊維は、コンクリート中でより機械的な付着（粘性）を付与すると考えられることや、波型部分をストレート状に伸ばした場合、本来の繊維長（43mm）より長くなることから、繊維1本あたりの表面積が増加し、マトリックスとの接触面積が増加することなどにより、流動性の低下が表れたと考えられる。なお、ストレートに関しては、他の繊維と比較しスランプフローが小さく計測されたが、これは、本実験で用いたストレートの繊維同士が結束されていないため、投入した際に多数の繊維

とペーストが吸着し、流動性が低下したと考えられる。

#### (2) 空気量

図-3 に空気量試験結果を示す。フック-AおよびBの空気量がベースコンクリートを下回る結果となったが、フックの波型が大きく波数が増加すると、空気量もそれに伴って増加する傾向を示すことがわかる。これは、フックの加工形状が複雑になるにしたがい空気の巻き込み程度が大きくなることを示していると考えられる。また、ストレートの空気量がフック-AおよびBよりも大きく計測されたのは、スランプフロー試験結果と同様に、繊維投入時の状態が他と異なることが要因だと推察できる。本実験から、マトリックスとの付着性能を向上させるために施されたフック加工でも、フック-Dのようなフックの波数が多い繊維を混入した場合、空気量（エントラップドエア）もかなり増大していく傾向を示すことが明らかとなった。従って、フレッシュ性状の確保の上でも、空気量制御の観点から、高流動・高強度コンクリートの繊維形状の選定には十分留意する必要がある。

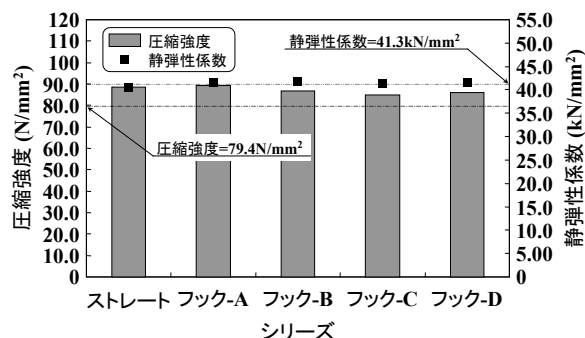


図-4 圧縮強度試験結果および静弾性係数

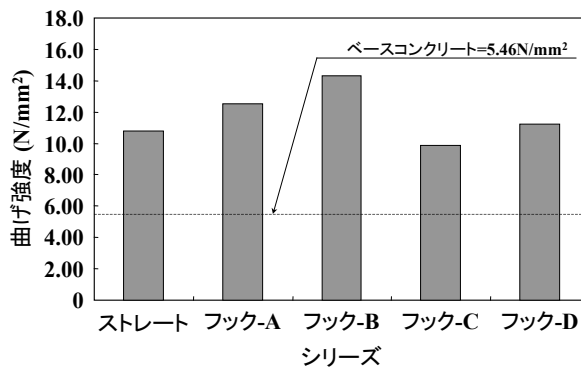


図-5 曲げ強度試験結果

ると言える。さらに、空気量の増大は、硬化後の物性に及ぼす影響が大きいと推察されるため、繊維形状が空気量に及ぼす影響の程度を十分に把握する必要があると言える。

以上より、本実験から良好と判断される繊維のフック形状は、フック-A および B のように、波数が少なく、滑らかな曲線に加工した繊維だと言える。さらに、比較的長い繊維長を有する鋼繊維は、混入率が少量でもフレッシュコンクリートとしての性能低下が著しいと考えられる。両者の鋼繊維は、フレッシュコンクリートでの目視観察から、材料分離も確認されずその性状は良好と判断される。また、ベースコンクリートと比較して、著しいスランプフローの低下、あるいは空気量の増大が確認されず、この形状がフレッシュ性状に及ぼす影響は比較的小さいと判断して良いと言える。

#### 4.2 硬化コンクリート

##### (1) 圧縮強度試験結果および静弾性係数

図-4 に各鋼繊維により補強したコンクリートの圧縮強度試験結果および静弾性係数を示す。試験結果はそれぞれ 3 本の平均値である。ベースコンクリートの圧縮強度の平均値は 79.4N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数の平均値は 41.3kN/mm<sup>2</sup>であった。この図から、鋼繊維を混入したことで、わずかではあるが圧縮強度が向上していることがわかる。また、繊維形状に着目した場合、各繊維における圧縮強度値、および静弾性係数値に有意な相違点を確認できないことから、繊維形状が両者に及ぼす直接的な影響はほとんど

ないと判断できる。なお、フレッシュコンクリートにおいて、フック-D の空気量が最も大きく計測されたが、圧縮強度試験結果からは、その影響を明瞭に確認することができなかった。

##### (2) 曲げ試験結果

図-5 に各鋼繊維によって補強したコンクリートの曲げ強度試験結果を示す。試験結果はそれぞれ 4 体の平均値で、ベースコンクリートの曲げ強度の平均値は 5.46N/mm<sup>2</sup>であった。この図から、形状に関わらず、鋼繊維を混入したことで曲げ強度が大幅に向上することは明白であり、各繊維においてベースコンクリートの約 2 倍以上の強度向上が確認できる。また、曲げ試験後の供試体破壊断面の観察から、全てのシリーズにおいて、繊維がほぼ伸展して引抜けているのが確認された。さらに、繊維のフック形状に着目した場合、曲げ強度において、片振りのフック-A (12.5N/mm<sup>2</sup>) よりも両振りのフック-B (14.3N/mm<sup>2</sup>) の方が良好と判断できる。一方、フック-C (9.85N/mm<sup>2</sup>) およびフック-D (11.2N/mm<sup>2</sup>) に関しては、強度向上が実現できても混入率 1.0%においては未加工のストレート (10.8N/mm<sup>2</sup>) と大差ないと言えよう。フック形状の補強効果を幾何学的に観察すると、片振り加工より両振り加工の方が、曲げ引張力が均一に伝達される傾向が大きいと推察され、ひび割れ発生から最大荷重に至るまでの架橋効果に優れていると判断される。すなわち、繊維の長手方向に対し、片側のみに加工を施した場合、マトリックスから引抜ける際にストレート

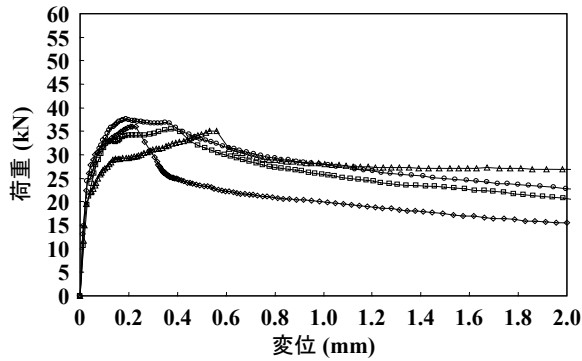


図-6 荷重と変位の関係 (ストレート)

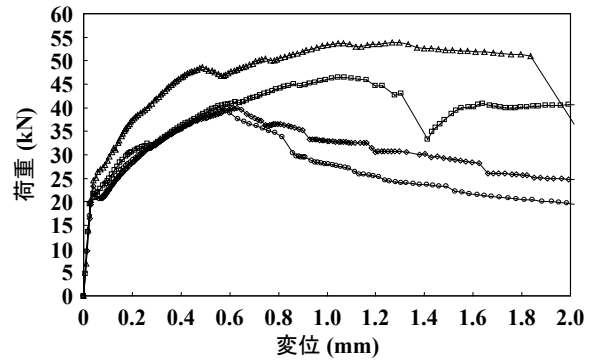


図-7 荷重と変位の関係 (フック-A)

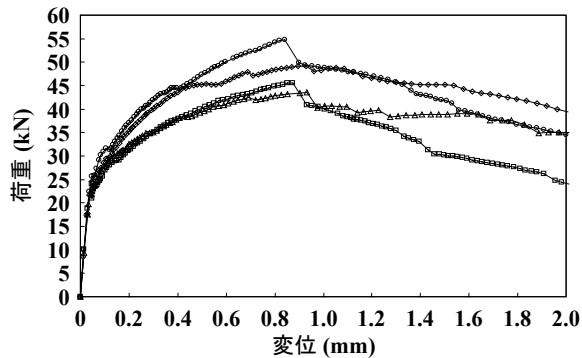


図-8 荷重と変位の関係 (フック-B)

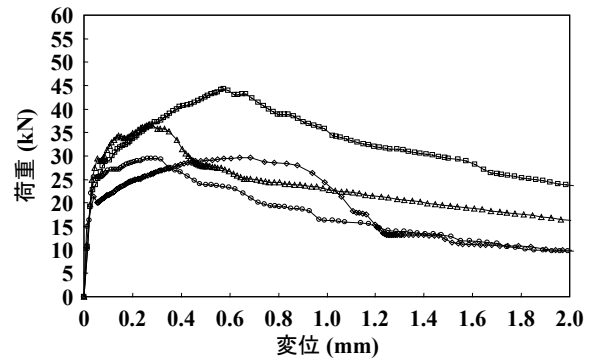


図-9 荷重と変位の関係 (フック-C)

状に伸展し易いと考えられ、両側に加工を施した場合は、マトリクスとの噛合う領域が拡大するため、ストレート状に伸展し難く、ひび割れ発生後の曲げ引張力に対して十分抵抗できたと推察される。

図-6～図-10 に各鋼繊維の荷重と変位の関係を示す。変位曲線は 2.0mm までを表示した。

それぞれの荷重と変位の関係において、同一鋼繊維の 4 体の曲げ挙動を比較すると、図-7 に示すフック-A のバラツキが最も多いことがわかる。特に、ポストピーク挙動に関しては、一時的な荷重低下が確認されるものもあり、曲げ挙動に対する繊維形状の特性を鮮明に捉えることが比較的困難と判断される。

個々の鋼繊維に着目すると、図-6 に示すストレートに関しては、最大荷重は他の繊維よりも小さいが、それ以降の耐荷性能に関しては、荷重低下において比較的優れていると言える。また、図-9 および図-10 に示すフック-C および D に関しては、ほぼ同様な性状を示していると判断でき、他の繊維と比較すると耐力保

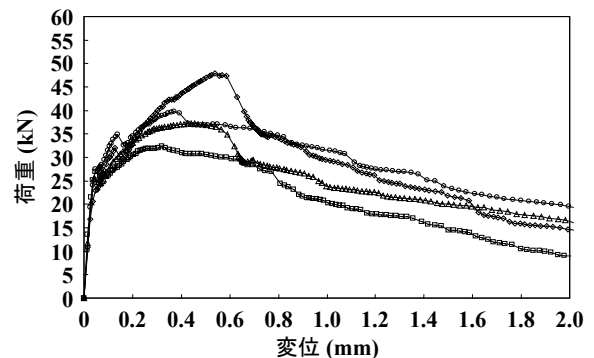


図-10 荷重と変位の関係 (フック-D)

持性能に劣っていると言える。しかし、フック-D のフック形状を両振りに加工すれば、最大荷重、並びに耐荷性能の向上が期待できると推察される。

一方、図-8 に示すフック-B に関しては、供試体間のバラツキ程度が比較的小さいことに加え、最大荷重値の向上、並びに耐力保持性能（曲げタフネス）の良否から、靱性性能に優れた繊維だと判断できる。これは、前述した曲げ強度試験結果と同様に、フック形状を両振りに加工したことによって、マトリクスとの噛合い領域が増加し、ひび割れ発生から最大荷重に

至るまで、また、その後の挙動において、繊維の架橋効果が適切に作用したものであると推察される。マトリックスに対するフック形状の補強効果を幾何学的観点から説明することが今後可能だと判断でき、鋼繊維とマトリックスとの噛合い領域、あるいは形状による噛合い程度が鋼繊維によって異なることが明らかになると言えよう。

図-11 に各鋼繊維の荷重と変位の関係から曲げタフネスを算出した曲げ靱性係数値を示す。算出した曲げタフネスは、変位 2.0mm までのものである。全体的に、前述した曲げ強度試験結果と同様な傾向を示していることが確認できる。さらに、靱性性能（曲げタフネス）の良否に関しても、強度試験結果と同様にフック-B が良好と判断できる。

以上の結果から、鋼繊維補強した高流動・高強度コンクリートの曲げ性能は、同一断面形状を有していてもフックの加工形状によって異なる性状を示すことが判明した。すなわち、フック形状によって、マトリックスとの噛合い程度が異なるため、ひび割れ発生後から最大荷重に至るまでの架橋効果、さらにはそれ以降のポストピーク挙動に差が生じる。従って、曲げ強度ならびに靱性性能の両面から、フック型鋼繊維を使用する場合の形状の選定には十分留意する必要があると言える。

本実験から、最も良好と判断されたフック形状は、繊維の長手方向に対して両振りに加工を施したフック-B と言えよう。

鋼繊維を混入して最も改善されるコンクリートの性能は、曲げ強度およびタフネスを含む曲げ性能であるため、繊維形状の選定には硬化後の物性を優先して考慮することが望ましいと言える。特に、フック-C およびフック-D は、曲げ強度の向上が実現できても、ストレートと大差ないことから、フックの加工形状も十分留意する必要があると言える。

## 5. まとめ

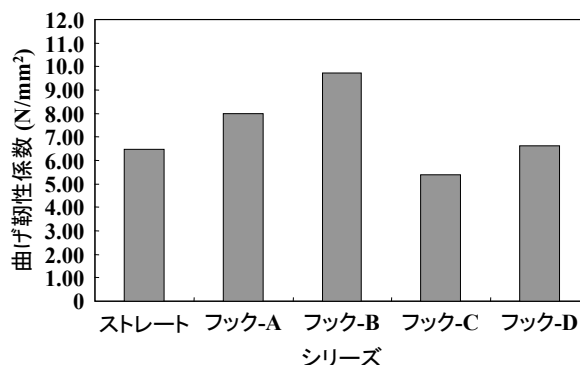


図-11 曲げ靱性係数の算定結果

本研究は、同一断面形状で異なったフック形状を有する 4 種類の鋼繊維を対象に、形状の違いが高流動・高強度コンクリートの物性に及ぼす影響の解明を目的に実施したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 繊維端部のフックの波型が大きく、波数が増加すると、高流動・高強度繊維補強コンクリートのスランプフローは減少する傾向を、空気量は増加する傾向を示す。
- (2) フック-C およびフック-D の曲げ強度、および曲げ靱性係数は、未加工繊維であるストレートとほとんど変わらない。フック加工を施したことで、必ずしも曲げ性能を改善することにはならないことが明らかとなった。
- (3) フック形状の補強効果を幾何学的観点から観察した場合、繊維端部のフック加工は、繊維の長手方向に対して両振りに施すのが望ましく、本実験からはフック-B が良好と判断される。

## 参考文献

- 1) 上原匠, 堀田新之介, 牛田耕悟, 梅原秀哲: 高流動繊維補強コンクリートの配合設計に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.245-250, 2003.7
- 2) 土木学会編: 鋼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 50, pp.47-52, 1983.3