

論文 コンクリートのコンシステンシーに対する微小鋼繊維の影響

堀口 至^{*1}・佐伯 昇^{*2}・市坪 誠^{*3}・竹村 和夫^{*4}

要旨：施工性の高い鋼繊維補強コンクリートの開発を目指して長さ 6mm の微小鋼繊維に注目し、繊維混入率 0～4%の範囲で微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシー試験を行った。試験結果より、2%を超える高い繊維混入率の範囲でも微小鋼繊維のコンシステンシー増加に対する影響は、一般的に使用される長さ 30mm の短繊維を混入したコンクリートと比較して小さいことが分かった。また曲げ試験より微小鋼繊維の補強効果について検討したところ、微小鋼繊維は繊維長が短いためひび割れの拡大よりもひび割れ発生に対して効果的であると考えられる。

キーワード：繊維補強コンクリート, 微小鋼繊維, コンシステンシー, 最適細骨材率

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは一般的に長さ 30 mm 程度の短繊維をコンクリート中に混入したものであり、繊維がコンクリートに発生したひび割れ間に架橋してひび割れの拡大・伝播を抑制する。その補強効果は繊維混入率の増加に伴い増大するが、同時にフレッシュ状態での施工性低下も生じる。そのため、鋼繊維補強コンクリートの適用は舗装やトンネルライニングなどの無筋コンクリートに限られ、鉄筋コンクリート構造物に用いられた例は非常に少ない。

著者らは施工性の高い鋼繊維補強コンクリートの開発を目指して、一般的に使用されている長さ 30mm 程度の鋼繊維よりも長さの短い微小鋼繊維(長さ 6mm)を用いて、研究を行っている。研究結果¹⁾によると、繊維混入率 0～2%の範囲では、微小鋼繊維を混入したコンクリートの方が長さ 30mm の鋼繊維を混入したコンクリートよりもコンシステンシーが小さいことから、施工性低下に対する影響が小さいことが分かった。また微小鋼繊維の補強効果については、繊維長さが短いため長さ 30mm 程度の鋼繊維よりもひ

び割れ拘束効果は小さい。そのため微小鋼繊維は、2%を超える高い繊維混入率の微小鋼繊維補強か、長さ 30mm 程度の鋼繊維と組み合わせたハイブリッド繊維補強での使用が効果的であろうことが分かった。

本研究は先の研究結果を踏まえて、繊維混入率 0～4%の範囲で微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシー試験を行い、2%を超える高い繊維混入率でのコンシステンシーに対する影響について明らかにすることを目的とした。また併せて力学特性試験も行い、微小鋼繊維の補強効果についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試験にはセメントに普通ポルトランドセメント、粗骨材には碎石(表乾密度=2.66g/cm³, 最大骨材寸法=20mm), 細骨材には混合砂(川砂+山砂+石灰石砕砂, 表乾密度=2.53g/cm³, 粗粒率=2.67, 吸水率=2.13%)を用いた。混和剤には AE 剤(AE)を用いた。繊維混入率が高い一部の配合においては、流動性が低くなりコンシステンシー試験

*1 呉工業高等専門学校	環境都市工学科助手	工博 (正会員)
*2 北海道大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻教授	工博 (正会員)
*3 呉工業高等専門学校	環境都市工学科助教授	工博 (正会員)
*4 呉工業高等専門学校	環境都市工学科教授	工博 (正会員)

が困難になるため、ポリカルボン酸系の高性能減水剤(SP)を用いた。鋼繊維には長さ 6mm の微小鋼繊維(SF6)と、比較のために土木分野で一般的に用いられている繊維端部にフック加工が施された長さ 30mm の鋼繊維(以下、短繊維:SF30)の2種類を用いた。表-1に鋼繊維の特性を示し、図-1に使用した鋼繊維を示す。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。配合表に示す記号は、PC が繊維無混入のプレーンコンクリートを示し、SC6 が SF6 を混入した微小鋼繊維補強コンクリートを、SC30 が SF30 を混入した短繊維補強コンクリートを示す。ハイフンに続く数字は繊維混入率を表しており、例えば SC 6-10 であれば SF6 を 1%コンクリート中に混入していることを表す。

本研究では微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーを検討するために、繊維混入率 0~4%の範囲での最適細骨材率を求めた。鋼繊維補強コンクリートにおける最適細骨材率とは、繊維混入率および単位水量を一定にして細骨材率を変化させたときに、コンシステンシーが最小となる細骨材率である。

試験に用いた配合の単位水量が 3 水準となっているが、これは打設時期が異なりコンシステンシーへの温度による影響が現れたためである。フレッシュコンクリートのコンシステンシーに対する単位水量の影響も懸念されるが、繊維混入率が同じであればコンシステンシーに関わらず最適細骨材率はほぼ一定値をとる²⁾との報告もある。そこで本研究では単位水量が最適細骨材率に与える影響は小さいとして、基準となる PC の目標スランプおよび空気量がそれぞれ $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.5\%$ となるように試験練りを行った。その結果、 $W=180\text{kg/m}^3$ の場合、スランプ 10.5cm 、空気量 3.7%となり、 $W=186\text{kg/m}^3$ の場合、スランプ 8.0cm 、空気量 5.1%となり、 $W=192\text{kg/m}^3$ の場合、スランプ 8.5cm 、空気量 4.1%となり、条件を満足している。

コンクリートの製造は JSCE-F 551「試験室に

表-1 使用鋼繊維の特性

記号	形状寸法 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)	形状
SF6	$\phi 0.16 \times 6$	38	1100	ストレート
SF30	$\phi 0.62 \times 30$	48	2000	両端フック



図-1 使用鋼繊維

表-2 配合表

記号	Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	AE	SP
					(C×%)	
PC	—	50	45	180	1.0	—
				186	1.0	
				192	4.0	
SC6-10	1.0		37～53	186	1.0	—
			45～53	192	4.0	
SC6-20	2.0		40～56	186	1.0	—
			45～57	192	4.0	
SC6-30	3.0		38～58	186	1.0	0.8
SC6-40	4.0		47～61		1.0	1.2
SC30-10	1.0		45～51	180	1.0	—
SC30-20	2.0		49～57			

における鋼繊維補強コンクリートの作り方」に基づいて行った。練混ぜには容量 10ℓのオムニミキサを使用し、マトリクスとなるコンクリートを先に練り混ぜ(練混ぜ時間 2 分)、その後ミキサを動かしながら鋼繊維を投入して、繊維が均一に分散するよう更に 1 分間練り混ぜた。

2.3 試験方法

(1) コンシステンシー試験

一般的に鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーは大きく、繊維混入率が高い場合などスランプ試験では評価ができない。そこで本研究ではコンシステンシー試験として、硬練りコンクリート用の試験方法である VB 試験を行った。図-2に VB 試験装置を示す。VB 試験装置

はコーンにより形成されたコンクリート試料に振動を与え、試料が円筒容器内で水平に締め固められるまでに要する時間、VB 値(sec)を測定するものである。VB 試験装置の振動テーブルの振動数は 3000vpm, 振幅は 1.0mm である。

(2) 力学特性試験

本研究では力学特性試験として、曲げ試験および圧縮強度試験を行った。両試験とも試験材齢は 28 日(20℃水中養生)である。

曲げ試験は JSCE-G 552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に基づいて行い、供試体には 100×100×400 mm の角柱を用いた。供試体中央の変位は変位計によって計測を行った。図-3に曲げ試験装置を示す。供試体の配合は水セメント比 50%, 単位水量は SC6 の場合 186kg/m³, SC30 の場合 180 kg/m³, 細骨材率はコンシステンシー試験から得られた最適細骨材率を用いた。曲げ試験より得られた最大荷重から、式(1)を用いて曲げ強度 f_b (N/mm²)を求めた。また鋼繊維補強コンクリートのタフネスを検討するために、スパンの 1/150 の変位 δ_{ib} (2mm)となるまでの荷重-変位曲線下の面積 T_b (N・mm)を求め、式(2)より曲げじん性係数 $\bar{f}_b$ (N/mm²)を求めた。

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (1)$$

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

ここで、 P ：最大荷重(N), l ：スパン(mm), b ：破壊断面の幅(mm), h ：破壊断面の高さ(mm)

圧縮強度試験は、コンシステンシー試験に用いた試料から円柱供試体(φ 100×200mm)を製作して、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいて試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 コンシステンシー試験結果

SC6 において、繊維混入率および単位水量を

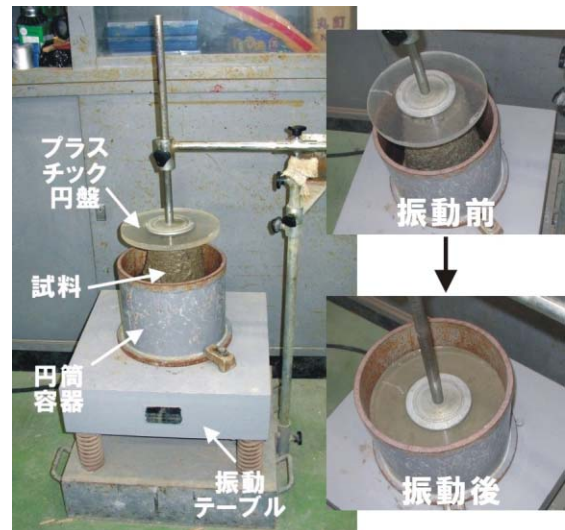


図-2 VB 試験装置

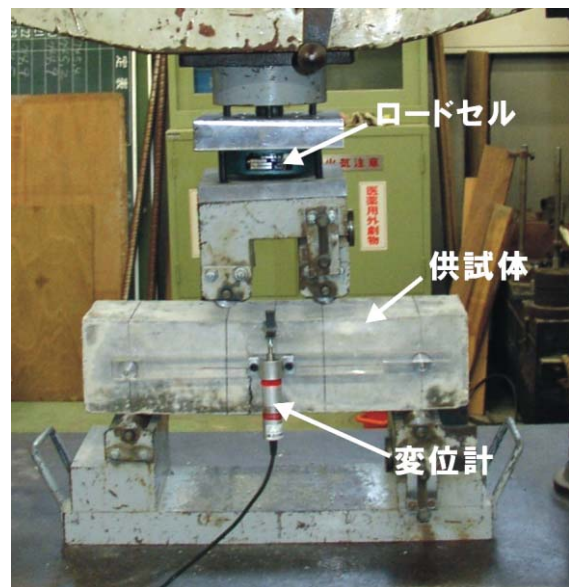


図-3 曲げ試験装置

一定として細骨材率を変化させた場合の細骨材率と VB 値の関係を図-4a～c に示す。試験結果より、混入率 1～4%の範囲で VB 値が最小、すなわちコンシステンシーが最小となる最適細骨材率が確認される。SC6-10, 20 においては、2 水準の単位水量の配合を用いたが、両者の最適細骨材率はほぼ同じであり、単位水量が最適細骨材率に与える影響は小さいことが分かる。

図-5 に、SC6 における繊維混入率と図-4 より得られた最適細骨材率の関係を示す。SC30 についても SC6 と同様に最適細骨材率を求め、既往の研究²⁾ による試験データ(水セメント比 50%,

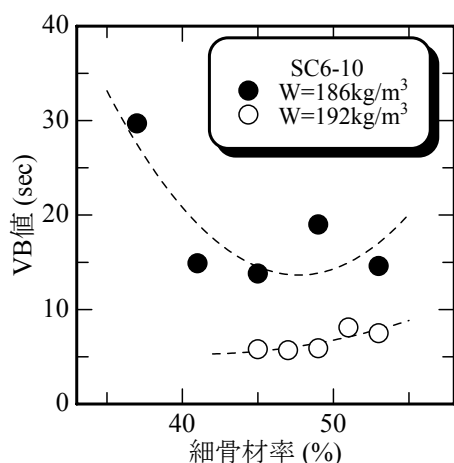


図-4a 繊維混入率とVB値の関係(SC6-10)

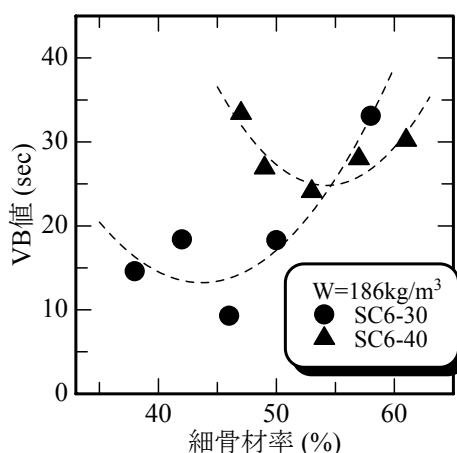


図-4c 繊維混入率とVB値の関係(SC6-30, 40)

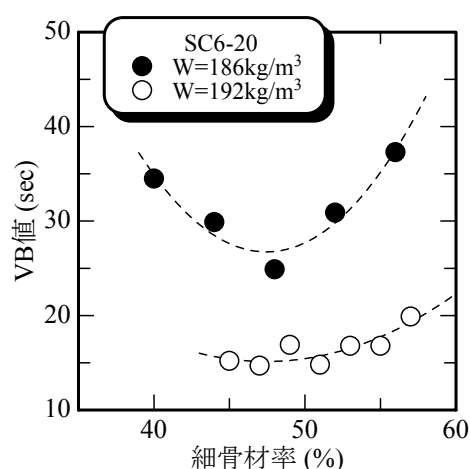


図-4b 繊維混入率とVB値の関係(SC6-20)

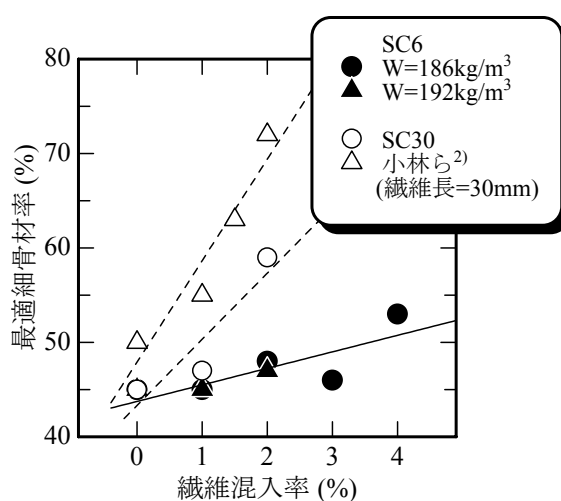


図-5 繊維混入率と最適細骨材率の関係

最大粗骨材寸法 20mm, $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$ の短繊維使用)とともに併せて図に示している。図中の直線は、試験データから最小二乗法により近似したものである。図より、繊維混入率増加に伴う最適細骨材率増大の割合は、短繊維と比較して微小鋼繊維の方が小さいことが分かる。

鋼繊維補強コンクリートの配合設計では、一般に繊維混入率が増加すると細骨材率を大きく設定するが、これはコンクリートの流動性の一因であるモルタル分を増加させるためである。既往の研究²⁾では長さ 30mm の短繊維と最大寸法 20mm の粗骨材を使用する場合、混入率 0.5% の増加に対して細骨材率を 8%大きくすると報告している。2%を超える高い混入率の範囲においても、微小鋼繊維の混入率増加に伴う最適細骨材率増大の割合が小さいということは、微小

鋼繊維補強では高い繊維混入率でもモルタル分を増加させずに流動が期待できるということであり、微小鋼繊維は短繊維と比較してコンシステンシー増加に対する影響が小さいと言える。すなわち、微小鋼繊維はコンクリートの施工性を損ねずに、短繊維よりも多量に混入することが可能である。

3.2 力学特性試験結果

(1) 曲げ試験結果

SC6 および SC30 において、繊維混入率を増加させたときの典型的な荷重—変位曲線をそれぞれ図-6a, b に示す。図より SC6, SC30 ともに繊維混入率の増加に伴い、曲げ特性は向上することが分かる。SC6 および SC30 の繊維混入率と、荷重—変位曲線より求めた曲げ強度および曲げじん性係数の関係をそれぞれ図-7a, b

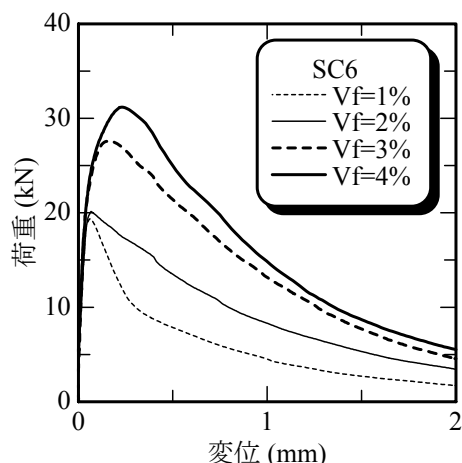


図-6a 荷重—変位曲線(SC6)

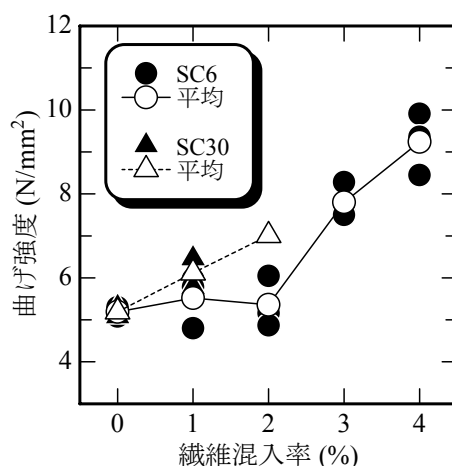


図-7a 繊維混入率と曲げ強度の関係

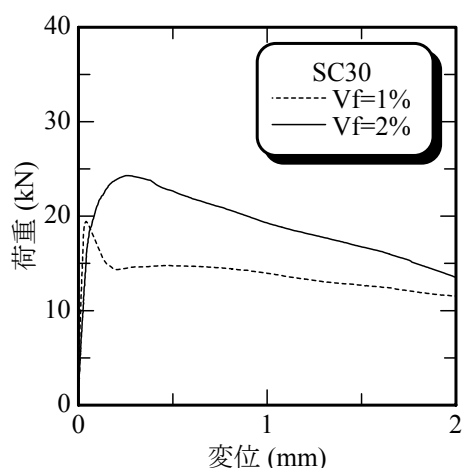


図-6b 荷重—変位曲線(SC30)

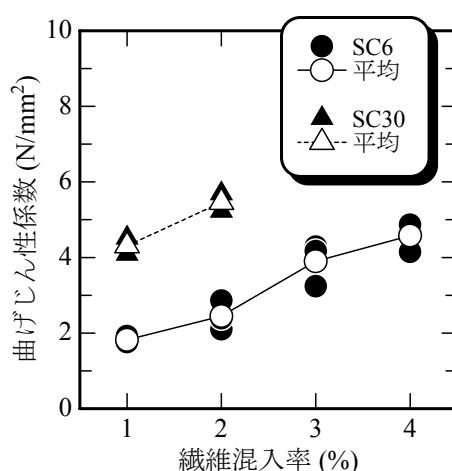


図-7b 繊維混入率と曲げじん性係数の関係

に示す。図より SC6 の曲げ強度は、混入率 2% までは補強効果がほとんど見られないが、3～4% の高い混入率になると繊維混入率の増加に伴い曲げ強度も増大する傾向を示し、混入率 2% の SC30 の曲げ強度を上回る値を示す。一方 SC6 の曲げじん性係数は、繊維混入率の増加に伴い増大する傾向を示すが、4% の高い混入率でも混入率 1% の SC30 の曲げじん性係数と同程度の低い値を示す。

ひび割れに対する繊維補強効果は、ひび割れ発生に対する補強とひび割れ拡大に対する補強の 2 種類に分けられる。Rossi ら³⁾によれば、繊維長の長い短繊維がマクロなひび割れを拘束するのに効果的であるのに対し、繊維長の短い微小鋼繊維は多量に混入することでミクロなひび割れを抑制できると報告している。以上のこ

とより、微小鋼繊維はその繊維長ゆえにひび割れ拡大に対する補強効果は小さいが、コンクリートのコンシステンシーに対する影響は短繊維よりも小さいため多量に混入することが可能であり、ひび割れ発生に対しての補強効果は大きいと考えられる。

(2) 圧縮強度試験結果

図-8に SC6 および SC30 における繊維混入率と各試験値を PC の圧縮強度(SC6 : 37.7N/mm^2 , SC30 : 24.6N/mm^2)で除した圧縮強度比の関係を示す。繊維混入率が同じでも細骨材率が異なる配合の試験値を同時に示しているため若干のばらつきが見られる。SC6 の圧縮強度比は、混入率 2% までは PC よりも同程度か少し高い値を示すが、混入率 3～4% では低下する傾向を示す。微小鋼繊維を多量に混入することによって、

圧縮強度が低下する原因として、混入繊維の空気巻き込みが挙げられる。鋼繊維を混入することで、コンクリート練混ぜ中に空気を巻き込み空気量が増加する現象が生じるが、この傾向は繊維混入率が高くなるほど著しくなる⁴⁾。本研究では供試体作製の際に空気量測定は行っていないが、同様の現象が生じたものと考えられる。そのため圧縮強度に対する微小鋼繊維の補強効果を厳密に検討するためには、消泡剤と AE 剤を併用して空気量調整を行い、マトリクス性状を一定としなければいけない。

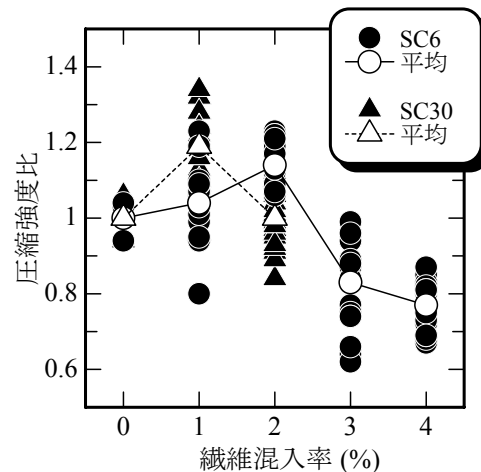


図-8 繊維混入率と圧縮強度比の関係

4. まとめ

本研究は施工性の高い鋼繊維補強コンクリートの開発を目指して、繊維混入率 0～4%の範囲で長さ 6mm の微小鋼繊維を混入したコンクリート(SC6)のコンシステンシーについて検討を行った。比較のために長さ 30mm の短繊維を混入したコンクリート(SC30)を用いた。また併せて力学特性試験も行い、微小鋼繊維の補強効果についても検討を行った。以下に本研究により得られた知見をまとめる。

- (1) コンシステンシー試験結果より、2%を超える高い繊維混入率の範囲でも SC6 における繊維混入率の増加に伴う最適細骨材率の増大の割合が SC30 より小さいことから、微小鋼繊維は短繊維と比較してコンシステンシー増加に対する影響は小さいと言える。
- (2) 曲げ試験結果より、2%を超える繊維混入率の SC6 の曲げ強度は SC30 よりも高い値を示すが、曲げじん性係数においては微小鋼繊維を 4%混入しても繊維混入率 1%の SC30 と同程度の低い値を示すことから、微小鋼繊維はひび割れの拡大よりもひび割れ発生に対して効果的であると考えられる。
- (3) 圧縮強度試験より、繊維混入率 2%までの SC6 の圧縮強度は PC よりも同程度か少し高い値を示すが、繊維混入率 3～4%では低下する傾向を示した。これは繊維による空気の巻き込みが一因と考えられるため、圧縮強度に

対する微小鋼繊維の補強効果を厳密に検討するためには、消泡剤と AE 剤を併用して空気量調整を行う必要がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ベカルトアジアより鋼繊維を、株式会社フローリックより混和剤を提供して頂きました。また実験を行う際に、呉高専環境都市工学科の吉岡慧君、藤井一志君、見世裕樹君、坂本裕樹君、松岡由佳さんに多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀口至ほか：微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーについて、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.279-284, 2004
- 2) 小林一輔, 岡村雄樹：所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法, 土木学会論文報告集, Vol.293, pp.111-119, 1980.4
- 3) Rossi, P., Acker, P. and Malier, Y.: Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure, Materials and Structures, Vol.20, No. 120, pp.436-439, 1987
- 4) 堀口至：繊維補強コンクリートの強度と変形特性および水密性に関する研究, 北海道大学学位論文, 2003