

論文 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

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

要旨：鋼繊維補強コンクリートは混入した長さ 30mm 程度の短繊維がひび割れ間に架橋し、ひび割れを拘束する。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。本研究では施工性の高い鋼繊維補強コンクリートを目指すために長さが 6mm の微小鋼繊維に注目し、フレッシュ状態のコンシステンシーについて検討を行った。繊維混入率 0~2.0%の範囲でコンシステンシーについて検討したところ、微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーは長さ 30mm の短繊維を混入したコンクリートよりも大きいことが分かった。また、微小鋼繊維の補強効果についても検討した。

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コンクリートの引張特性を改善するために開発されてきており、コンクリート中に混入した長さ 30mm 程度の短繊維がひび割れ間に架橋し、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。施工性が低下するとマトリクス中への繊維の均一な分散が難しく、最悪の場合、繊維同士が絡まりあったファイバーボールが形成される。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。

鋼繊維補強コンクリートについては 1970 年代から研究が盛んに行われているが、その力学性能や耐久性に関する研究がほとんどである。近年になり、施工性改善策として鋼繊維補強コンクリートの高流動化について研究^{1),2)}が行われているが、未だその数は少ない。

著者らは一般的に鋼繊維補強コンクリートに

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 15mm 以下)を用いて研究^{3),4)}を行っている。微小鋼繊維は、長さ 30mm 程度の鋼繊維がマクロなひび割れに効果的であるのに対して、マトリクス中へ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言われている⁵⁾。ひび割れ拘束以外の微小鋼繊維の利用法として、施工性改善のための利用が考えられる。すなわち、微小鋼繊維は長さが短いため繊維の分散が容易であり、また繊維混入率を高くしても繊維同士が絡まりあう危険性が従来使用されている鋼繊維よりも小さい。

そこで本研究では施工性の高い鋼繊維補強コンクリートを目指すために微小鋼繊維に注目し、フレッシュ状態のコンシステンシーについて検討することを目的とした。また、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

*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)

ト、粗骨材には砕石(表乾密度=2.68g/cm³, 最大骨材寸法=20mm), 細骨材には混合砂(表乾密度=2.54g/cm³, 粗粒率=2.73, 吸水率=2.14%)を用いた。混和剤には AE 剤を用いた。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 SC6-10 であれば SF6 を 1.0%コンクリート中に混入していることを表す。

鋼繊維補強コンクリートでは, 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ると, コンシステンシーが最大となる細骨材率が存在する。これは最適細骨材率と呼ばれ, 繊維混入率の増加に伴い増大する⁶⁾。そこで微小鋼繊維補強コンクリートの最適細骨材率を検討するために, 単位水量 192kg/m³, 繊維混入率 0~2.0%の範囲において, 細骨材率を 45~57%の範囲で変化させてコンシステンシー試験を行った。比較のため, SC30 に対しても同様に最適細骨材率の検討を行ったが, 単位水量は SC6 と異なり 180kg/m³としている。これは SC6 と SC30 とで打設時期が異なることによる。単位水量が異なるとフレッシュコンクリートのコンシステンシーへの影響が懸念されるが, 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⁶⁾と報告されているため, 本研究では単位水量がコンシステンシーに与える影響は小さいとした。ただし, SC6, SC30 の基準となる PC のスランプと空気量は同じになるように, 試験練りを行った。目標スランプおよび空気量はそれぞれ 8±2.5cm, 4.5±

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	φ 0.16×6	38	1100	ストレート
SF30	φ 0.62×30	48	2000	両端フック

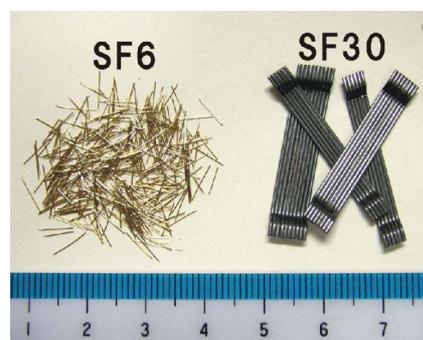


図-1 使用鋼繊維

表-2 配合表

記号	混入率 Vf (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	AE (C×%)
PC	—	50	45	192	4
SC6-10	1.0		45, 47, 49, 51, 53		
SC6-20	2.0		45, 47, 49, 53, 55, 57		
PC	—	50	45	180	1.0
SC30-10	1.0		45, 47, 49, 51		
SC30-20	2.0		49, 51, 53, 55, 57		

1.5%であり, 試験練りの結果, SC6 の基準となる PC はスランプ 8.5cm, 空気量 4.1%となり, SC30 の基準となる PC はスランプ 10.5cm, 空気量 3.7%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

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, コンシステンシー試験を行った。コンクリートのコンシステンシー試験としてはスランプ試験が広く用い

られているが、鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーは小さいため、スランプ試験では評価できない場合があり、この傾向は繊維混入率が高くなるのに伴い顕著になる。そのため鋼繊維補強コンクリートでは、硬練りコンクリート用のコンシステンシー試験を用いることが多い。硬練りコンクリート用の試験方法は、試料に振動を与えてコンシステンシーの測定を行う試験であり、本研究ではわが国においてよく用いられている VB 試験を行いコンシステンシーの評価を行った。

図-2に VB 試験装置を示す。VB 試験装置はコーンによって形成されたコンクリート試料に振動を与え、試料が円筒容器の中で水平に締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。試験に用いるコーンはスランプコーンの形状と同じであるため、スランプ試験も併せて行った。

本研究では微小鋼繊維補強コンクリートの品質確認のために、SC6 について圧縮強度試験を行った。各配合につき 4 本の円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を作製して、打設から約 24 時間後に脱型を行い、水温 20°C の養生槽で 27 日間の水中養生を行った。

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, SC30 において、繊維混入率 2.0% のフレッシュコンクリートをそれぞれ図-3 a, b に示す。図より、SC6 では多数の微小鋼繊維 SF6 がコンクリート中に分散しており、SC30 の繊維分散状況とは著しく異なることが分かる。

SC6 において繊維混入率および単位水量を一定とし、細骨材率を 45~57% の範囲で変化させた場合の細骨材率と VB 値、またはスランプの関係を示す。試験結果より、繊維混入率が 2.0% の場合、細骨材率が変化することによりコンシステンシーが最大となる最適細骨材率が確認され、その値は 47.5% であ

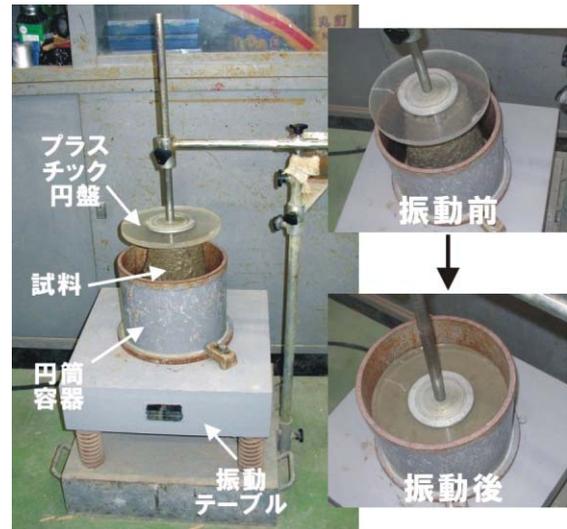


図-2 VB 試験装置



図-3a フレッシュコンクリート (SC6-20)



図-3b フレッシュコンクリート (SC30-20)

った。繊維混入率が 1.0% の場合の最適細骨材率は 45% 以下と推定される。

SC30 において繊維混入率および単位水量を一定とし、細骨材率を 45~57% の範囲で変化させた場合の細骨材率と VB 値、またはスランプの関係を示す。試験結果より、繊維混入率が 1.0% の場合に SC6-20 と同様に最適細骨材率が確認され、その値は 47% であるが、繊維混入率が 2.0% の場合の最適細骨材

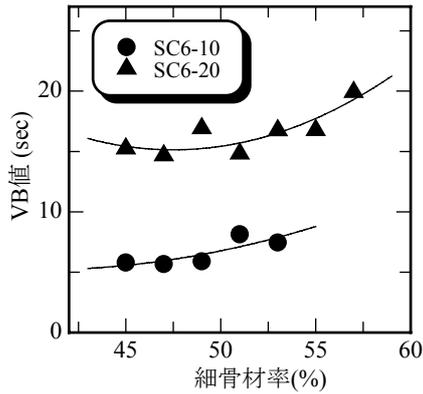


図-4 a 細骨材率と VB 値の関係 (SC6)

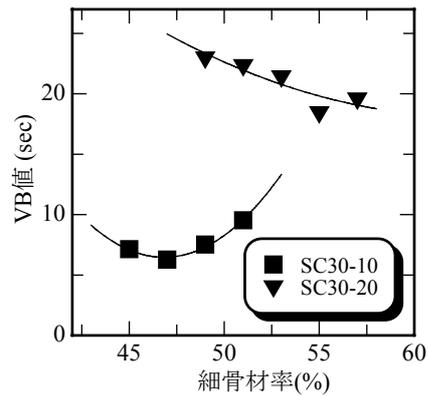


図-5 a 細骨材率と VB 値の関係 (SC30)

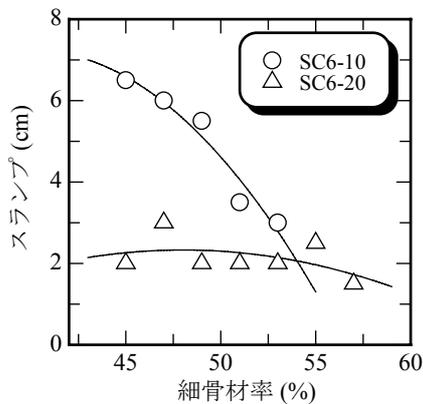


図-4 b 細骨材率とスランプの関係 (SC6)

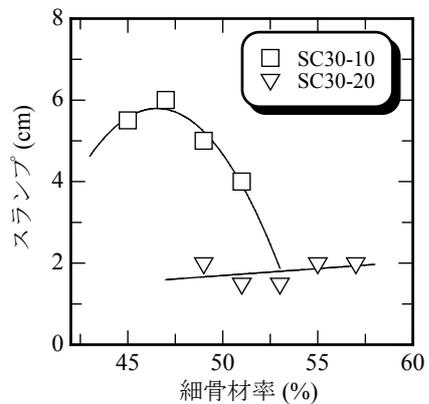


図-5 b 細骨材率とスランプの関係 (SC30)

率は 57%以上になると推定される。

図-6 に図-4 および 5 より求めた SC6, SC30 における繊維混入率と最適細骨材率の関係を示す。併せて、既往の研究⁶⁾による試験データ(水セメント比 50%, 最大骨材寸法 20mm, 0.5×0.5×30mm の鋼繊維使用)についても図に示している。ただし本研究の SC6-10, SC30-20 においては最適細骨材率が明確に求められていないため、SC6-10 は 45%, SC30-20 は 57% とした。図より、コンクリート中に短繊維 SF30, 微小鋼繊維 SF6 どちらを混入することによっても、最適細骨材率は増加することが分かる。また、繊維混入率の増加に伴い最適細骨材率は大きくなる傾向を示し、その増加の割合は短繊維よりも、微小鋼繊維を混入した方が小さいことが分かる。すなわち、コンシステンシー低下に対しては微小鋼繊維よりも短繊維混入の影響の方が大きく、微小鋼繊維補強コンクリートは一般の短繊維補強コンクリートよりもコンシステンシーが大きい

と言える。

繊維混入によるコンクリートのコンシステンシーの低下は、鋼繊維表面にモルタルが付着するため流動性に寄与するモルタルが減少するという表面積効果や、分散した繊維がコンクリートの自重による変形を内部拘束により妨げている一種のかさばり効果が原因と言われている⁶⁾。微小鋼繊維 SF6 は短繊維 SF30 と比較してかなり細かいため、同一繊維混入率ではコンクリート中に混入される本数は非常に多い。そのため微小鋼繊維を混入したコンクリートの方が繊維の表面積増加によるコンシステンシーの低下が生じやすいと考えられる。繊維の形状寸法より繊維の表面積効果を概算したところ、同一繊維混入率では SF6 の表面積は SF30 の約 4 倍になる。しかし、微小鋼繊維よりも短繊維の方がコンシステンシー低下に与える影響が大きいことを考えると、繊維補強コンクリートのコンシステンシーの低下は鋼繊維の表面積効果よりも、

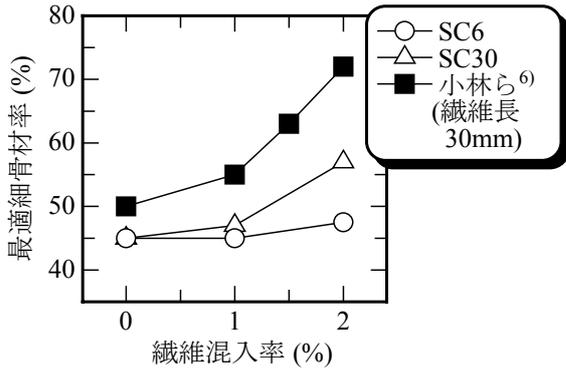


図-6 繊維混入率と最適細骨材率の関係

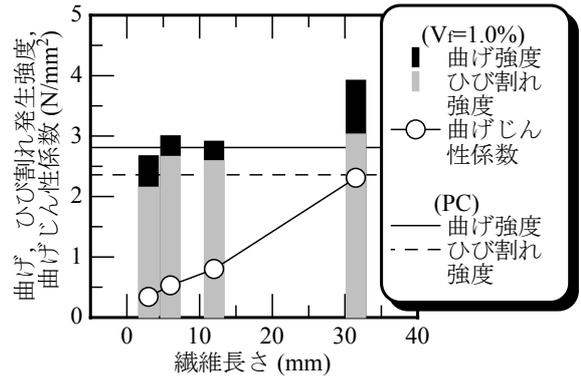


図-7 繊維長さと曲げ特性の関係

かさばり効果の方が大きいと言える。

3.2 微小鋼繊維の補強効果

SC6の品質確認のために行った圧縮強度試験結果より、微小鋼繊維混入によるコンクリートの圧縮特性の変化はほとんど見られないことが分かった。これはコンクリートの圧縮強度に対する繊維混入の影響が小さいからである。そのため、一般にコンクリートに混入した鋼繊維の補強効果を検討するためには、曲げ変形試験を行うことが多い。本研究では曲げ変形試験を行っていないため、過去の研究データにより微小鋼繊維の補強効果について検討した。

コンクリートに混入した鋼繊維の補強効果は一般に繊維長さに依存し、繊維長さが長くなるにつれて補強効果が増大する。図-7に繊維混入率1.0%一定として、繊維長さを3~30mmに変化させたときの鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性³⁾を示す。図より、繊維長さが短いと一般的に使用されている長さ30mmの短繊維と比較して補強効果が小さいことが分かる。そのため微小鋼繊維を補強材として効果的に使用するためには次の2種類の方法が挙げられる。

まず1つ目として、微小鋼繊維がコンクリートのコンシステンシー低下に及ぼす影響が小さいことを利用して、多量にコンクリート中に混入することである。著者らの予備実験によると、繊維混入率4.0%の微小鋼繊維補強コンクリートの打設が可能である。また、長さ6mmの微小鋼繊維を3.0%混入したコンクリート(SC6)の場合、長さ30mmの鋼繊維を2.0%混入したコン

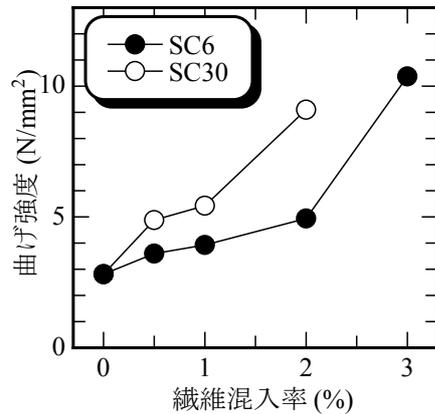


図-8 高繊維混入率の微小鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度

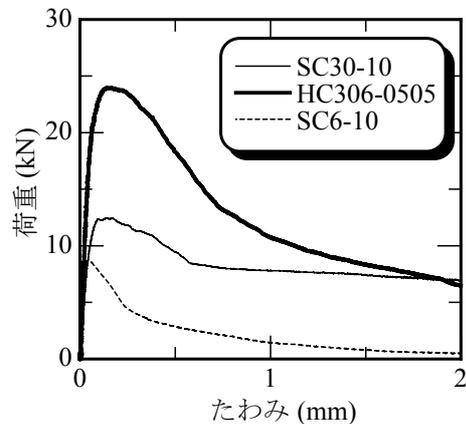


図-9 曲げ特性に対する単一繊維とハイブリッド繊維の補強効果の比較

クリートと同等の力学特性を示す⁴⁾という実験結果を得ている(図-8)。2つ目の方法として、形状寸法の異なる鋼繊維を組み合わせるハイブリッド繊維補強にすることである。ハイブリッド繊維補強は2種類以上の繊維を組み合わせることで混入し、単一繊維補強では得ることの出来ない力学的、物性的効果を得るものである。図-9に長さ

30 mm の短繊維と長さ 6mm の微小鋼繊維をそれぞれ混入率 0.5%で組み合わせて混入したハイブリッド繊維補強コンクリート(HC306-0505)と、混入率 1.0%の単一繊維補強コンクリート(SC30-10, SC6-10)の曲げ変形試験により求めた荷重-たわみ曲線⁷⁾を示す。図より形状寸法の異なる鋼繊維を組み合わせることによって、単一繊維補強よりも曲げ特性の増進が見られる。

以上のことより、施工性の高い鋼繊維補強コンクリートを目指すために微小鋼繊維を利用するためには、今後の研究課題として、2.0%以上の高い繊維混入率の微小鋼繊維補強コンクリート、または長さ 30mm 程度の形状寸法の異なる短繊維を組み合わせたハイブリッド繊維補強コンクリートのコンシステンシーと繊維補強効果を関連付けて検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では施工性の高い鋼繊維補強コンクリートを目指すために、繊維混入率 0~2.0%の範囲で長さが 6mm の微小鋼繊維を混入した繊維補強コンクリート(SC6)のコンシステンシーについて検討を行った。また、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、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) コンシステンシーが最大となる最適細骨材率を検討した結果、繊維混入率の増加に伴う最適細骨材率の増加の割合は SC6 よりも SC30 の方が大きいことから、微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーは大きいことが分かった。
- (2) コンシステンシー低下に対しては微小鋼繊維よりも短繊維混入の影響が大きいことから、繊維の形状寸法を考慮すると繊維補強コンクリートのコンシステンシーの低下はかさばり効果の影響が大きいと言える。
- (3) 微小鋼繊維を補強材として効果的に使用するには、2.0%以上の高い混入率でコンクリ

ート中に微小鋼繊維を混入することや、長さ 30mm 程度の形状寸法の異なる短繊維と組み合わせてハイブリッド繊維補強にすることが効果的である。

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、本研究室卒業生の小河内誠君(岡山大学)、吉岡慧君(呉高専専攻科)、善山久徳君(山口大学)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) 栗田守朗, 田中博一: 鋼繊維を混入した高流動コンクリートのフレッシュ性状, 土木学会第 53 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.538-539, 1998.10
- 2) 上原匠ほか: 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報告集, Vol.25, No.1, pp.245-250, 2003
- 3) 堀口至, 佐伯昇: コンクリートの水密性および曲げ特性に対する形状寸法の異なる鋼繊維の補強効果, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.129-140, 2003.11
- 4) 堀口至ほか: 微小鋼繊維補強コンクリートの水密性および力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.299-304, 2003
- 5) Rossi, P., Acker, P. and Malier, Y.: Effect of steel fibers at two different stages: the material and the structure, Materials and Structures, Vol.20, No. 120, pp.436-439, 1987
- 6) 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
- 7) 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