

論文 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および力学特性

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 程度の短繊維がコンクリートの流動に抵抗するため、その施工性は著しく低下する。本研究は施工性の良好な鋼繊維補強コンクリートの開発を目指して、長さ 30mm の短繊維の一部を長さ 6mm の微小鋼繊維で置換し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および力学特性について検討を行った。試験結果より、短繊維をハイブリッド繊維とすることで、短繊維補強コンクリートのコンシステンシーを低下できることが分かった。ハイブリッド繊維補強コンクリートの力学特性では、短繊維補強コンクリートよりも圧縮強度は高いが、曲げ特性は低いことが分かった。

キーワード：繊維補強コンクリート、ハイブリッド繊維、コンシステンシー、力学特性

1. はじめに

コンクリートは他の建設材料と比較してコストパフォーマンスに優れた材料であるが、ひび割れが発生しやすいという弱点を持つ。鋼繊維補強コンクリートは、コンクリート中に混入された長さ 30mm 程度の鋼繊維がひび割れ間に架橋することで、ひび割れの拡大、伝播を防ぐ。鋼繊維補強効果は繊維混入率の増加に伴い高くなるが、同時にフレッシュ時に鋼繊維がコンクリートの流動に抵抗するため施工性は著しく低下する傾向を示し、最悪の場合、鋼繊維の均一な分散が妨げられ繊維同士が絡まりあう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は、コンクリートの流動性が低くても打込みに支障が少ないトンネルライニングや舗装などの無筋コンクリートに使用が限定され、高いひび割れ抵抗性を有するにもかかわらず取り扱いにくい材料であるため、その用途を狭くしている。

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。これまでの研究結果^{1),2)}によると、繊維混入率 0~4%の範囲における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 の鋼繊維を混入したコンクリートよりも小さいことが分かっている。しかし微小鋼繊維の繊維長さは非常に短いため、ひび割れ拡大に対する補強効果はあまり大きくない。

以上の背景より本研究では、短繊維の一部を微小鋼繊維で置換し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および力学特性について検討を行った。すなわち繊維長さの大きい短繊維の一部を、繊維長さの小さい微小鋼繊維で置換することで、ひび割れ抵抗性を保ちつつ、繊維混入によるコンシステンシー増加の抑制を狙っている。また、長さの異なる 2 種類の鋼繊維を組み合わせるハイブリッド繊維は、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³⁾についても期待できる。

*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	高等教育機能開発総合センター研究員	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)

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), 細骨材には川砂(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, 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。図-1に試験に使用した鋼繊維を示し, 表-1に鋼繊維の特性を示す。

2.2 コンクリートの配合

コンシステンシー試験用の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, SC30 が SF30 を混入した単一繊維補強コンクリートを示し, HC30/6 が SF30 の一部を SF6 で置換して混入したハイブリッド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し, HC30/6-05/05 であれば SF30 と SF6 が 0.5%づつ混入していることを表す。本研究では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, 表-2に示すように細骨材率を変化させて各繊維混入率においてコンシステンシーが最小となる最適細骨材率⁴⁾を求めた。

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

(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



図-1 使用鋼繊維

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

表-2 配合表(コンシステンシー試験)

記号	Vf (%)		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE (C×%)	SP
	SF6	SF30			W	C	S	G	SF6	SF30		
PC	—		50	45	186	372	736	946	—		0.01	—
SC6-10	1.0	—		37～53			596～853	1066～795	78.5			—
SC6-20	2.0			40～56			634～887	1000～733	157			—
SC6-30	3.0			38～58			592～904	1016～689	235.5			0.8
SC6-40	4.0			47～61			721～936	855～629	314			1.2
SC6-50	5.0			49～61			739～920	809～619	392.5			2.0
SC30-10	—	1.0		39～51			627～820	1032～830	—	78.5		—
SC30-20		2.0		51～63			807～997	817～617		157		0.1
HC30/6-05/05	0.5	0.5		39～51			627～820	1032～830	39.25	39.25		—
HC30/6-10/10	1.0	1.0		44～56			696～888	934～732	78.5	78.5		

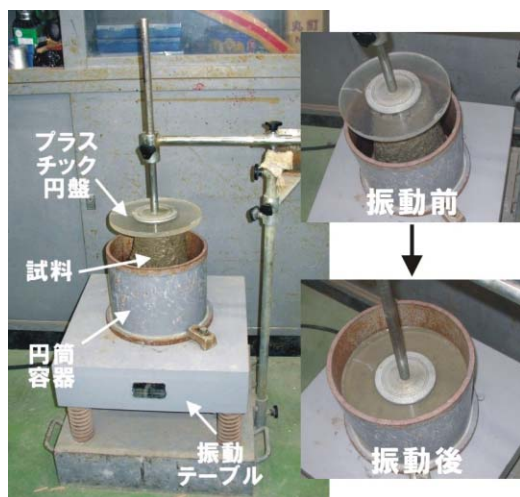


図-2 VB 試験装置

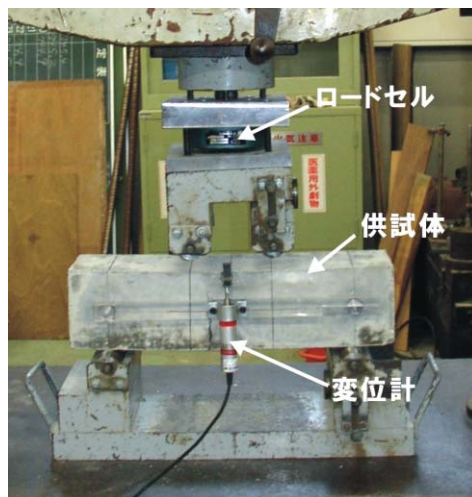


図-3 曲げ試験装置

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、圧縮強度試験および曲げ試験を行った。両試験とも試験材齢は 28 日(20℃水中養生)である。圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいて行い、供試体には $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱を用いた。また、コンプレッソメータを用いて JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づいて静弾性係数も同時に求めた。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 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 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。

これまでの研究結果によると、コンクリート中に多量の微小鋼繊維を混入することで圧縮強度が低下する傾向を示すが、この原因として混

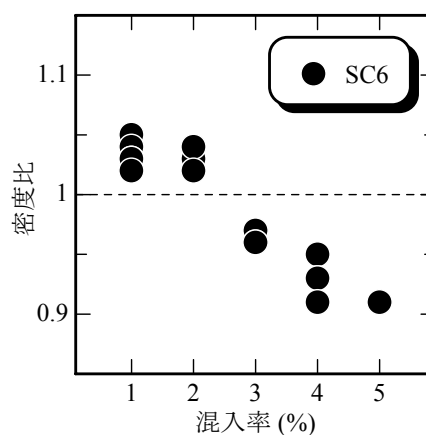


図-4 繊維混入率と密度比の関係(SC6)

入繊維による空気の巻き込みが挙げられる²⁾。図-4に繊維混入率 1～5%の範囲の SC6 において、コンシステンシー試験終了後の試料を用いて作製した供試体の密度比を示す。ここで密度比とは、圧縮強度試験用の円柱供試体の寸法と重さから求めた見かけの密度を、示方配合から計算した密度で除した比率のことである。図より、繊維混入率の増加に伴い密度比が低下することが分かる。コンシステンシー試験の試料については、最適細骨材率が判断できる程度の軟らかさが得られるように高性能減水剤で調整しているため、繊維混入率増加に伴う締め固め不足の影響も考えられる。しかし、SC6-20 と SC6-40 の VB 値の範囲は両者とも約 24～37 sec であるため、混入率の高い繊維補強コンクリートの圧縮強度の低下は混入繊維による空気の巻き込み

が主因であると言える。

以上のことより、コンクリートの力学特性に対するハイブリッド繊維の補強効果を厳密に検討するためには、マトリックスの性状を一定としないといけない。そこで本研究では高性能減水剤によりスランプを、消泡剤により空気量の調整を行い、目標スランプおよび空気量がそれぞれ 8 ± 2.5 cm, $4.5 \pm 1.5\%$ となるように、繊維混入率 1.0% の SC6-10, SC30-10, HC30/6-05/05 の 3 種類について配合調整を行い、力学特性試験の供試体の配合を求めた。なお細骨材率については、コンシステンシー試験より求まる最適細骨材率を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 コンシステンシー試験結果

図-5 に HC30/6 において、繊維混入率および単位水量を一定として細骨材率を変化させた場合の細骨材率と VB 値の関係を示す。図より、ハイブリッド繊維補強コンクリートにおいても微小鋼繊維補強コンクリート同様^{1),2)}、細骨材率と VB 値の関係が下に凸の曲線を描くことが分かる。図より最も VB 値が小さくなる細骨材率を最適細骨材率として、各繊維混入率における最適細骨材率を求めた。微小鋼繊維補強、短繊維補強コンクリートにおいても同様に最適細骨材率を求めている。

図-6 に、各鋼繊維補強コンクリートの繊維混入率と最適細骨材率の関係を示す。ただし、SC6, SC30 の最適細骨材率においては、単位水量が 186kg/m^3 とは異なるデータ^{1),2)} (SC6: 192kg/m^3 , SC30: 180kg/m^3) も併記している。これは鋼繊維補強コンクリートの最適細骨材率は基本的に繊維混入率と寸法によって支配され、単位水量の影響は小さい⁴⁾ ためである。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。図より近似直線の傾き、すなわち繊維混入率増加に伴う最適細骨材率の増大割合は、SC30, HC30/6, SC6 の順に小さくなり、HC30/6 の近似直線の傾きは SC30, SC6 のほぼ中間であ

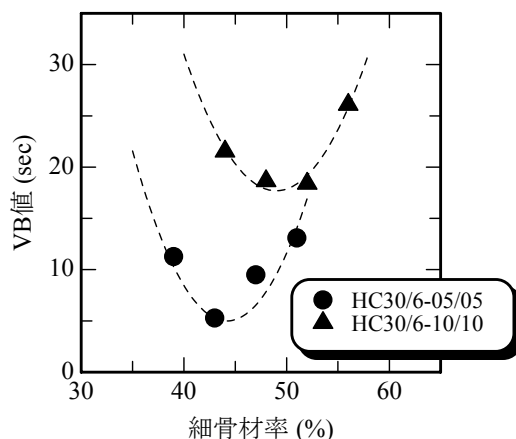


図-5 繊維混入率と VB 値の関係 (HC30/6)

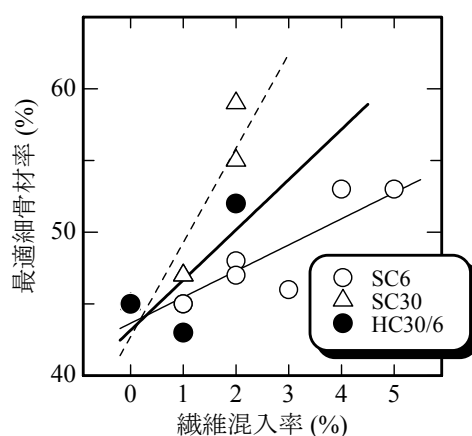


図-6 繊維混入率と最適細骨材率の関係

ることが分かる。

鋼繊維補強コンクリートにおける繊維混入率と最適細骨材率の関係は、混入繊維がコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響を表す。すなわち、混入率増加に伴う細骨材率の増大の割合が大きければ、コンシステンシー増加に対する混入繊維の影響が大きく、逆であれば混入繊維の影響が小さいことを意味する。図-6 より、ハイブリッド繊維の近似直線の傾きは短繊維よりも小さいことから、短繊維の一部を繊維長さの小さい微小鋼繊維で置換することによって、短繊維補強コンクリートのコンシステンシーを低下できることが分かる。微小鋼繊維による短繊維補強コンクリートのコンシステンシー低下の度合いは、ハイブリッド繊維の近似直線の傾きが微小鋼繊維よりも大きいことから、微小鋼繊維混入率に依存すると思われる。

表-3 配合表 (力学特性試験)

記号	Vf (%)		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE	SP	DF	スランプ (cm)	空気量 (%)
	SF6	SF30			W	C	S	G	SF6	SF30					
PC	—		50	45	186	372	736	946	—		0.01	—	—	8.0	5.1
SC6-10	1.0	—		45			724	931	78.5	—		0.1	0.03	7.5	5.4
SC30-10	—	1.0		47			756	896	—	78.5		0.15	0.02	8.0	6.0
HC30/6-05/05	0.5	0.5		43			691	966	39.25	39.25		0.15	0.02	9.0	4.9

3.2 力学特性試験結果

表-3 に繊維混入率が 1.0% の SC6, SC 30, HC 30/6 において、スランプと空気量を調整した力学特性試験用の配合を示す。表中の DF は消泡剤(Defoaming agent)を表す。表より、同一スランプを得るためには繊維長さの大きい SF30 が混入されると必要 SP 量が増加し、逆に同一空気量を得るためには繊維長さの短い SF6 が混入されると必要 DF 量が増加することが分かる。また、各配合における密度比は 1.04~1.05 となり、配合調整の結果、混入繊維による巻き込み空気の影響はほとんど無いと考えられる。

図-7 に繊維混入率が 1.0% の SC6, SC30, HC 30/6 および PC の圧縮強度および静弾性係数を示す。ただし、各試験値は 3 体の供試体の平均値を用いている。図より、SC30 の圧縮強度は PC と比べて若干低くなったが、SC6 は逆に増加する傾向を示した。また HC30/6 においては、ほぼ PC と同程度の試験値を示している。以上の結果より、鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度は SF6 の混入率が高くなることで増大すると言える。これは微小鋼繊維の繊維長さが非常に小さいため、微細なひび割れに対する拘束効果が高いからである。静弾性係数については全ての種類において、ほぼ同じ値を示した。

図-8 に繊維混入率 1.0% の SC6, SC30, HC30/6 の典型的な荷重—変位曲線を、図-9 a, b に荷重—変位曲線より求めた曲げ強度、曲げじん性係数をそれぞれ示す。図より、全ての鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性は PC よりも向上する傾向を示す。また、鋼繊維補強コンクリートの中では、HC30/6 の曲げ強度において試験値の大きなばらつきが見られるが、荷重—変位曲線、

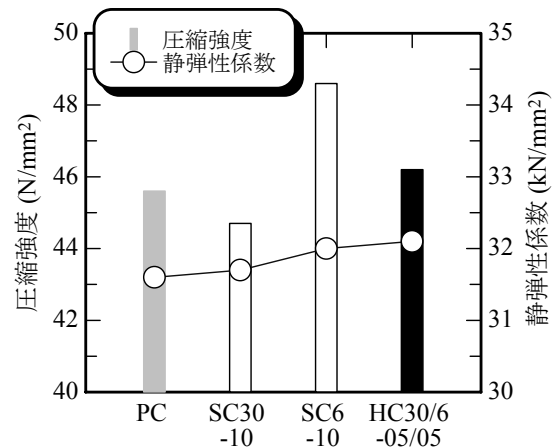


図-7 圧縮強度および静弾性係数

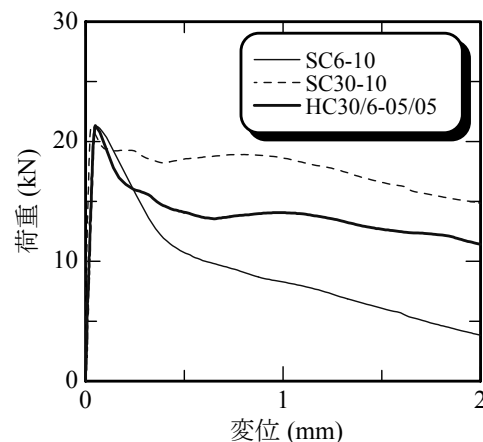


図-8 荷重—変位曲線

曲げじん性係数の試験結果より総合的に判断すると、圧縮強度と異なり曲げ特性は SF30 の混入率が高くなることで向上すると言える。これは引張力に対して、繊維長さの大きい繊維の方が、繊維—マトリクス界面において伝達できる応力が大きいためと考えられる。

以上の力学特性試験の結果をまとめると、短繊維の一部を微小鋼繊維で置換したハイブリッド繊維補強コンクリートは、短繊維補強コンクリートよりも圧縮強度は高いが、曲げ特性は低

いことが分かった。ハイブリッド繊維補強コンクリートの力学特性は、コンシステンシー同様、短繊維に対する微小鋼繊維の置換率に依存すると考えられる。また、長さの異なる2種類の鋼繊維を組み合わせることによって得られる繊維の組合せ効果が期待されたが、今回の実験結果からはその効果は見られなかった。しかし、HC30/6の供試体のうち1体だけ曲げ強度がSC30より大きいものもあったことから、繊維混入率や微小鋼繊維の置換率を変化させるなどして、力学特性に対する繊維の組合せ効果については今後の検討が必要である。

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を目指して、長さ30mmの短繊維(SF30)の一部を長さ6mmの微小鋼繊維(SF6)で置換し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および力学特性について研究を行った。以下に本研究により得られた知見をまとめる。

- (1) 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は、SF6を混入することで短繊維補強コンクリートよりも小さくなることが分かった。
- (2) 配合調整の結果、同スランプ、空気量を得るためにはSF30が混入されると高性能減水剤添加量が増加し、SF6が混入されると消泡剤添加量が増加することが分かった。
- (3) ハイブリッド繊維補強コンクリートの力学特性は、短繊維補強コンクリートと比較して圧縮強度は高いが、曲げ特性は低いことが分かった。また、力学特性に対する繊維の組合せ効果については見られなかった。

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。また実験の際には、呉高専環境都市工学科の吉岡慧君、友村圭祐君、川西里紗さん、藤川陽平君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。

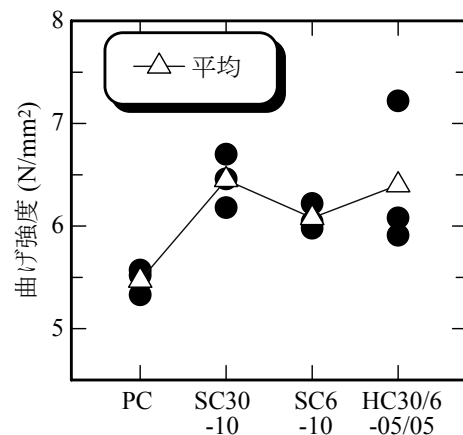


図-9a 曲げ強度

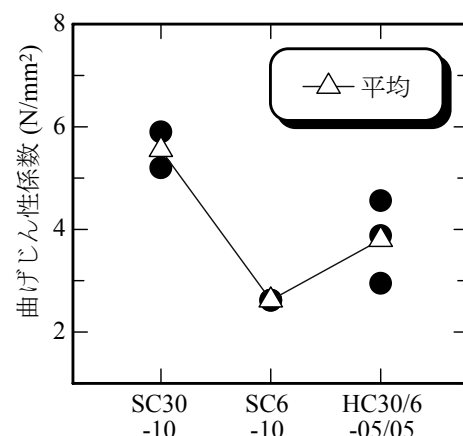


図-9b 曲げじん性係数

参考文献

- 1) 堀口至, 佐伯昇, 市坪誠, 竹村和夫: 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集, Vol.26, No.1, pp.279-284, 2004
- 2) 堀口至, 佐伯昇, 市坪誠, 竹村和夫: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.265-270, 2005
- 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) 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