

論文 鋼繊維補強高強度モルタルの諸性状

栗田守朗*1・塩屋俊幸*2・林 秀彦*3・吉武謙二*4

要旨：圧縮強度が130～200N/mm²を有する鋼繊維補強高強度モルタルの基本的性状を把握する目的で、圧縮強度、鋼繊維混入率および鉄筋径を要因として、フレッシュおよび硬化性状に関して実験的な検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。(1)流動性は鋼繊維の混入率に影響を受け、鋼繊維混入率が大きくなるにしたがい低下する。(2)圧縮強度は、鋼繊維混入率が増加することによる差異は認められないが、曲げ強度や曲げタフネスは鋼繊維混入率の増加にともない直線的に増加する。(3)最大付着応力度は、圧縮強度と鉄筋径の両者の影響を受ける。

キーワード：短鋼繊維、モルタル、フレッシュ性状、強度性状

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと呼ぶ）は、コンクリートの持つもろさを改善し、じん性を著しく高めた複合材料であり、地下構造物やトンネルのライニング、舗装（空港、道路）の増厚、各種構造物の補修・補強などに利用されている¹⁾。SFRCに用いられている鋼繊維は、長さが20～60mm、直径が0.3～0.8mmで、アスペクト比が40～80程度であり、鋼繊維の混入率としては1vol%が最も一般的に使用されている¹⁾。

一方、SFRCの高性能化を図る研究・開発が二つの方向で進められている。一つは、施工性を向上させる目的で高流動コンクリートを指向したものであり、他方は硬化コンクリートの性状を著しく向上させることを指向したものである。

前者は、シールドトンネルの施工法の一つであるECL（Extruded Concrete Lining）工法の一二次覆工コンクリートに適用するために開発されたものであり、鋼繊維を体積比で1%混入した高流動コンクリートが実際のシールド工事に使

用されている²⁾。

後者は、鋼繊維の混入率を大幅に高めることによりじん性を大幅に改善したコンクリートである。この範疇に分類される材料としては、ECC³⁾（Engineered Cementitious Composites）、SIFCON⁴⁾（Slurry Infiltrated Fiber Concrete）、SIMCON⁵⁾（Slurry Infiltrated Mat Concrete）、RPC⁶⁾（Reactive Powder Concrete）そしてCRC⁷⁾（Compact Reinforced Composite）が挙げられる。

このように鋼繊維の混入率を大幅に高めることによりじん性を著しく高めた鋼繊維補強材料は、材料費が高く作業性に制約が多いことなどから構造物に部分的に使用することが効果的である。例えば、プレキャスト部材の接合部、柱梁接合部等への適用可能性が高いと考えられる。

筆者らは、短鋼繊維を6%混入した鋼繊維補強高強度モルタルをプレキャスト部材の接合部に適用した実験を実施している。その結果、鉄筋の重ね継手長さを非常に短い10φ（鉄筋径φの10倍）としても良好な性能を有していることが明らかとなっている⁸⁾。本文は、短鋼繊維を

*1 清水建設（株） 技術研究所 土木研究開発部 主任研究員 工修（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 構造研究開発部 主任研究員 工博（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 土木研究開発部 工修（正会員）

*4 清水建設（株） 技術研究所 構造研究開発部 工修

混入した鋼繊維補強高強度モルタル（以下、CRCと呼ぶ）についてその基本的な諸性状を実験的に検討した結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 実験の組合せ

実験の要因と水準および試験の組合せを表-1および表-2にそれぞれ示す。

2.2 使用材料

(1) 結合材：AALBORG社製Densitセメント（密度：2.90 g/cm³）

(2) 細骨材

・静岡県浜岡産陸砂：表乾密度2.72g/cm³，吸水率1.77%，粗粒率3.04

・ポーキサイト砂

荒目（2-4mm）表乾密度3.79g/cm³，吸水率1.38%，粗粒率4.73

細目（0-1mm）表乾密度3.45g/cm³，吸水率4.04%，粗粒率1.88

ポーキサイト砂を使用する場合は，細目と荒目の混合割合を質量比で51.5：48.5とした。

(3) 鋼繊維：直径0.4mm×長さ12mmのstraight steel fiber，引張強さ1350N/mm²

(4) 水：練混ぜ水は水道水を用いた。

(5) 鉄筋：付着試験に供した鉄筋は、SD490の鉄筋を焼き入れし、高強度としたものを用いた。また、付着試験用試験体製作に際しては、補強用としてφ9の螺旋鉄筋を用いた。使用した鉄筋の引張試験結果を表-3に示す。

2.3 配合

試験に供したCRCの配合を表-4に示す。表-4中の配合を示す記号は次の通りである。例えば、CRC130-2は、「130」は目標圧縮強度130N/mm²を示し、「2」は鋼繊維混入率2vol%を示す。

2.4 製造

CRCは、55ℓの強制二軸練りミキサを用いて、図-1に示す方法で製造した。

2.5 試験項目

(1) フレッシュ性状

・スランプフロー：JSCE-F 503による。

・空気量：JIS A 1128による。

・単位容積質量：空気量試験で用いた試料を用いてJIS A 1116に準じて測定する。

(2) 硬化性状

・圧縮強度：JIS A 1118による。

・曲げ強度・曲げタフネス：JSCE-G 552による。

・ヤング係数：JSCE-G 502による。

・付着強度試験：付着強度試験に供した試験体

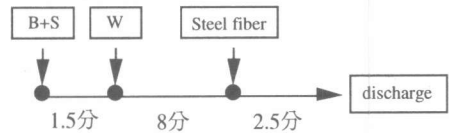


図-1 練混ぜ方法

表-1 要因と水準

factors	levels
Target compressive strength (N/mm ²)	130, 180
Re-bar	D19, D32, D51
fiber contents (vol%)	0, 1, 2, 3, 6

表-2 実験の組合せ

Re-bar	Target compressive strength	
	130 N/mm ²	180 N/mm ²
D19	0, 3 vol%	3 vol%
D32	0, 1, 2, 3, 6 vol%	0, 3 vol%
D51	0, 3 vol%	3 vol%

ただし、表中の数字は鋼繊維混入率を示す。

表-3 鉄筋の試験結果

	Yield point or 0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
D19	526	726
D19/hardening	1060	— *1
D32	536	697
D32/hardening	825	1160
D51	504	680
D51/hardening	544	730
φ9	331	450

*1：把持装置がすべったため計測ができず。

表-4 配合

Mix.	CRC130-0	CRC130-1	CRC130-2	CRC130-3	CRC130-6	CRC180-0	CRC180-3
W/B	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.187	0.187
S/B	1.44	1.41	1.38	1.35	1.26	1.80	1.68
Vf (vol%)	0	1	2	3	6	0	3
W (kg/m ³)	160	160	160	160	160	176	176
B (kg/m ³)	940	940	940	940	940	940	940
S (kg/m ³)	1349	1322	1294	1268	1186	1689	1581
Steel fiber (kg/m ³)	0	78.5	157	234	471	0	234
note	land sand	land sand	land sand	land sand	land sand	bauxite	bauxite

は、直径250mm高さ300mmの円柱とし、付着試験における付着長は 3ϕ （鉄筋の公称直径 ϕ の3倍）とした。これは、鉄筋が降伏する前に鉄筋が引き抜けることを考慮し、事前に実施した付着強度試験結果を参考にして付着長を設定した。付着試験は2MNのアムスラー型試験機にて行い、荷重と自由端すべり量を測定した。付着試験の概要を図-2に示す。

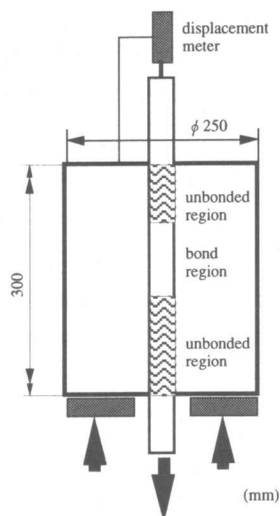


図-2 付着試験概要

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性

鋼繊維混入率 (Vf) とスランプフローとの関係を図-3に、Vfと単位容積質量との関係を図-4に示す。

スランプフローはVfの増加にともない直線的に減少しており、Vfの流動性に及ぼす影響が大きいことを示している。Vfが0vol%から6vol%まで変化した範囲では、スランプフローの低下量は350mm程度であった。試験に供した配合はペースト量を一定にしているため、Vfが増加すると鋼繊維に拘束されるペースト量が増えることにより流動性に寄与するペースト量が減少し、さらに、鋼繊維同志の機械的な絡み合いが生じることにより流動性が低下するものと考えられる。

モルタルの単位容積質量はVfの増加にともない増加しており、鋼繊維の密度の影響が現れている。CRC180における単位容積質量はCRC130

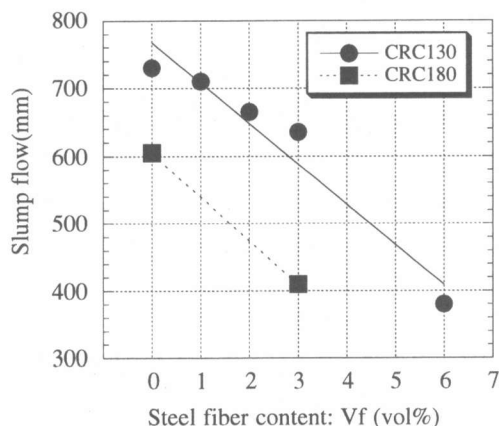


図-3 鋼繊維混入率とスランプフローとの関係

におけるそれよりも大きく、ポーキサイトの密度が陸砂よりも大きいことに起因していると考えられる。なお、空気量は全配合を通じて3～4%程度であった。

3.2 硬化性状

(1) 圧縮・曲げ特性

鋼繊維混入率 (Vf) と圧縮強度, 曲げ特性との関係を図-5～図-7に示す。CRC130の配合で材齢28日の圧縮強度は130N/mm², CRC180の配合では200N/mm²得られており, 当初の目標とした圧縮強度が得られた。

鋼繊維混入率と圧縮強度の関係から, Vfの増加にかかわらず圧縮強度には差異は認められなかった。Bache⁷⁾によれば, 鋼繊維混入率の増加(最大12vol%まで混入)にともない圧縮強度は増加すると報告されているが, 本実験の範囲である6vol%まででは, 顕著な影響は認められなかった。

曲げ強度および曲げタフネスはともにVfの増加にともない増加しており, 鋼繊維を混入した効果が現れている。CRC130の曲げ強度は, Vfが0vol%の場合約10N/mm²に対して, 6vol%では約20N/mm²であり, 約2倍の曲げ強度を有している。また, 同一鋼繊維混入率の場合, CRC180の曲げ強度はCRC130のそれと比較すると1.3～1.8倍となっている。これは圧縮強度の増加に伴いCRCそのものの引張強度が増加したことによるものと考えられる。

(2) 付着強度特性

最大付着応力度は, 最大荷重Pを鉄筋の公称表面積(公称周長×付着長さ)で除した値とし, 以下の式(1)により算出した。

$$\tau_{\max} = P / (\varrho \times L_b) \quad (1)$$

ただし, τ_{\max} : 最大付着応力度 (N/mm²),

ϱ : 公称周長 (mm),

L_b : 付着長さ (mm)

鋼繊維混入率と最大付着応力度との関係を配合別にそれぞれ図-8および図-9に, 圧縮強度と最大付着応力度との関係を図-10に示す。なお, 本試験では, CRC試験体が割裂した場合

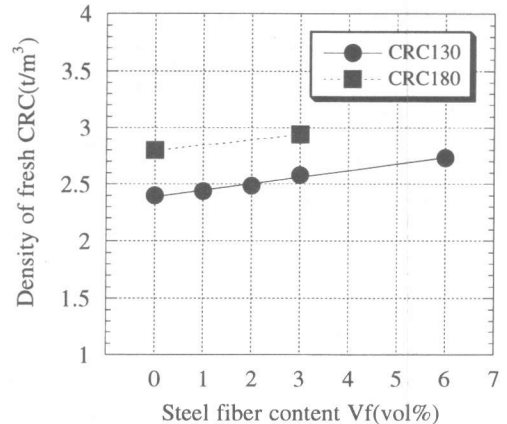


図-4 鋼繊維混入率と単位容積質量との関係

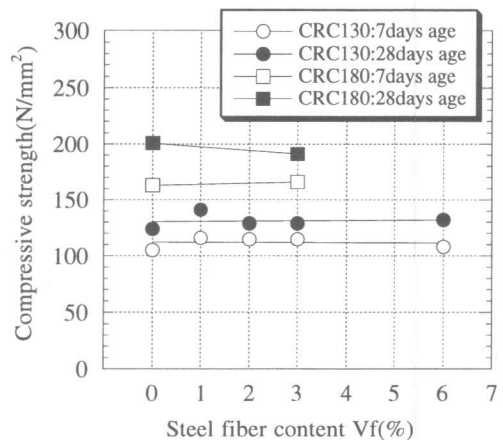


図-5 鋼繊維混入率と圧縮強度との関係

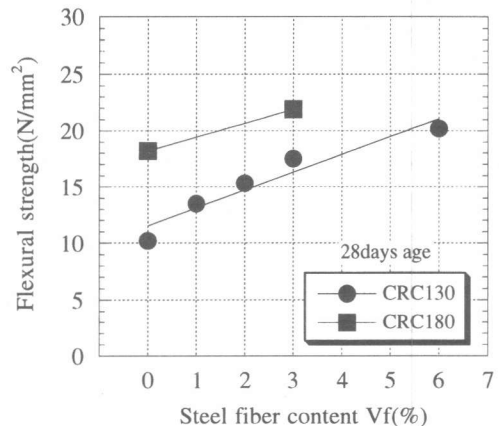


図-6 鋼繊維混入率と曲げ強度との関係

が3ケース (CRC130-0-D32, CRC130-0-D51, CRC130-3-D51) あり, 鉄筋が引き抜けなかったケースが1ケース (CRC180-3-D51) あった。鉄筋が引き抜けなかったケースは, 引抜き荷重が鉄筋の破断荷重に近づいたため試験を中断したものである。したがって, このケースの場合の最大付着応力度は測定値を上回るものと考えられる。それ以外は全てのケースで試験体が割裂せず鉄筋が引き抜けた。

最大付着応力度は鋼繊維混入率の増加にともない若干増加する場合も認められたが, 明確な傾向は認められなかった。

また, 最大付着応力度は鉄筋径が小さくなるにしたがい増加しており, その傾向は CRC130 および CRC180 の両者ともに同様であった。CRC130-0の配合の場合, D19を用いた場合の最大付着応力度は 55N/mm^2 であり, D51の場合の約2倍であった。

一方, 最大付着応力度は圧縮強度の増加にともない大幅に増加しており, CRC180における最大付着応力度は, D19の場合 87N/mm^2 であり, CRC130における 55N/mm^2 を大幅に上回っていた。この傾向は他の鉄筋径においても同様な結果であった。

図-11に鉄筋径と最大付着応力度との関係を示す。CRC130およびCRC180の両者とも, 最大付着応力度は鉄筋径の $-1/2 \sim -1/4$ 乗に比例しており, 付着強度に寸法効果が認められる。神野⁹⁾らは, 鉄筋の付着によって生じる割裂破壊強度に関する寸法効果の実験結果から, 付着割裂強度は鉄筋径が大きくなるとともに減少するいわゆる寸法効果があるとしており, 本試験結果も同様な傾向が認められた。なお, 本実験の場合, 試験体数が少ないこと, 破壊モードが異なることなどから付着強度の寸法効果については更に検討する必要であると考えられる。

以上の結果から, 鉄筋とCRCの最大付着応力度は鋼繊維混入率よりも圧縮強度により大きな影響を受けるとともに, 鉄筋径の影響も受けると考えられる。

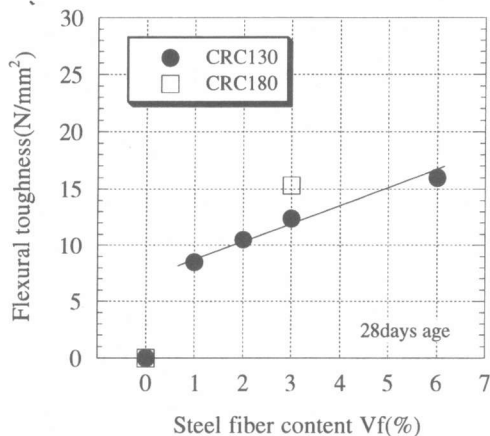


図-7 鋼繊維混入率と曲げタフネスとの関係

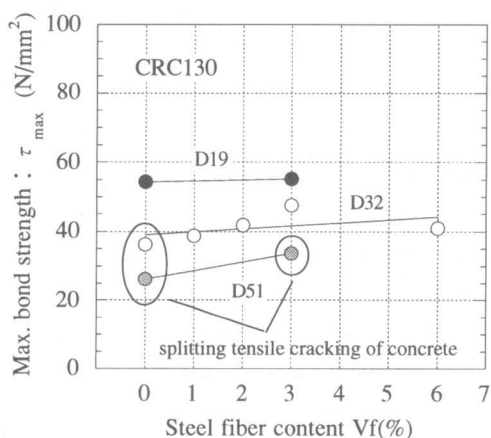


図-8 鋼繊維混入率と最大付着応力度との関係 (CRC130)

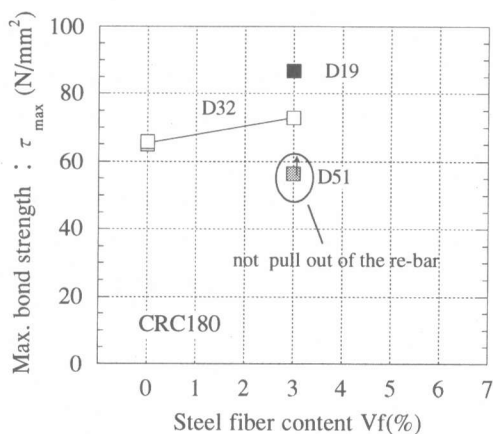


図-9 鋼繊維混入率と最大付着応力度との関係 (CRC180)

4. まとめ

CRCの基本的特性を把握するために鋼繊維混入率、圧縮強度および鉄筋径を要因とした実験を行った。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

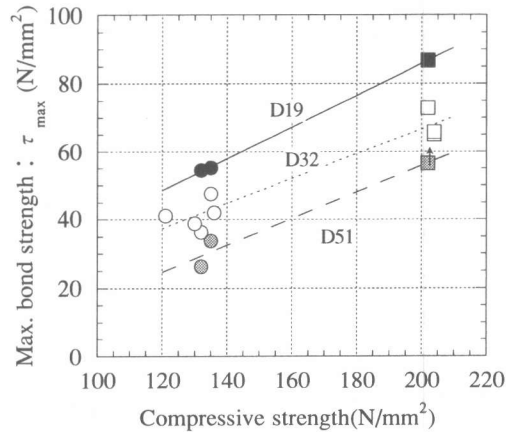
(1) フレッシュ性状は鋼繊維の混入率に大きな影響を受け、鋼繊維混入率が大きくなるにしたがい流動性は低下する。

(2) 圧縮強度は鋼繊維混入率の増加によって大きな影響を受けないが、曲げ強度や曲げタフネスは鋼繊維混入率の増加にともない直線的に増加する。

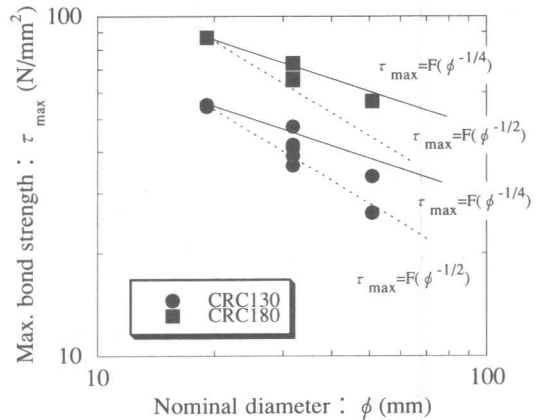
(3) 最大付着応力度は、圧縮強度の増加にともない増大する。また、最大付着応力度は鉄筋径が大きくなるにしたがい減少しており、付着強度の寸法効果が認められるようである。

参考文献

- 1) (社) 鋼材倶楽部・SFRC 構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル (トンネル編), 技報堂出版, 1995
- 2) 原田俊作, 渋谷都男, 栗田守朗：鋼繊維を混入した高流動コンクリートを用いたECL工法, 土木技術, pp.52-58, 1996.12
- 3) 林 秀彦, 橘 大介, 金子佳生, 稲田泰夫：短鋼繊維高混入モルタルの諸性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16-1, pp.1123-1128, 1994
- 4) Lankard, D.R. : Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984.12
- 5) Hackman, L.E., Farrell, M.B., and Dunham, O.O. : Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON), Concrete International, Vol.14, No.12, pp.53-56, 1992.12
- 6) Rechar P : Reactive Powder Concrete: A New Ultra-High-Strength Cementitious Material, 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, Paris, 1996



図一 10 圧縮強度と最大付着応力度との関係



図一 11 鉄筋径と最大付着応力度との関係

- 7) Bache, H.H. : Concrete and Concrete Technology in a broad Perspective, CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, 1995
- 8) 塩屋俊幸, 栗田守朗, 別所友宏, 辻 秀夫：鋼繊維補強高強度モルタル、H形鋼を用いたプレキャストコンクリート継手, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19-2, pp.1305-1310, 1997
- 9) 神野靖夫, 藤井 栄, 森田司郎：割裂を伴う付着特性の寸法効果に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.747-748, 1986.10