

報告 鋼繊維補強コンクリートの諸物性の改善

石関 嘉一^{*1}・小池 喜嗣^{*2}・深津 章文^{*3}・川瀬 哲也^{*4}

要旨：土間床繊維補強コンクリートに使用する鋼繊維には、通常、長さ 60mm の鋼繊維が用いられている。しかし、繊維長 60mm の鋼繊維は繊維長が比較的長いため、フレッシュ性状の低下、ポンプ圧送中の閉塞および鋼繊維の分散時間が短繊維と比較して長くなる問題がある。そこで、これらの問題を解決するために、既存の繊維長 43mm の鋼繊維形状を改良し、60mm の繊維を用いたコンクリート性能と同等以上の硬化性能を発揮することに成功した。また、繊維長が短くなったことによりフレッシュ性状、ポンプ圧送性および練混ぜ性能が向上した。
キーワード：鋼繊維，ポンプ圧送性，フレッシュ性状，練混ぜ性能，曲げじん性，土間

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向上が可能となり、じん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て格段に優れていることが利点として挙げられる。また、写真-1 に示すように、繊維を結束することにより、練混ぜ性能が向上し取り扱いが簡便になっている。

現在、写真-2 に示すような大型店舗や大型倉庫の土間床は施工時の鉄筋敷設による工期の遅延や鉄筋敷設によるコンクリート打設時の不具合等が発生している。また、供用後において土間床はフォークリフトや台車の頻繁な走行による苛酷な条件下に置かれ、ひび割れ等の問題が生じている。そこで、これらの不具合を軽減する目的で、建築構造物の土間床に繊維補強コンクリートが用いられるようになった。通常、土間床鋼繊維補強コンクリートに使用する鋼繊維には繊維長が 60mm のものが用られていた。しかし、繊維長 60mm は比較的長いため、スランプロスやポンプ圧送中の閉塞および鋼繊維の分散時間が短繊維と比較して長くなる問題がある。そこで、繊維長を 43mm と短くすることで、これ

らの問題を解決することを検討した。

本報告では、繊維長 60mm と形状の異なる 2



写真-1 鋼繊維の結束



写真-2 大型倉庫の土間床

*1 (株)ブリヂストン 土木・海洋資材開発部 (正会員)

*2 (株)ブリヂストン 土木・海洋資材開発部 課長

*3 (株)ブリヂストン 土木・建築資材営業技術部 課長

*4 (株)ブリヂストン 土木・建築資材販売促進第2部

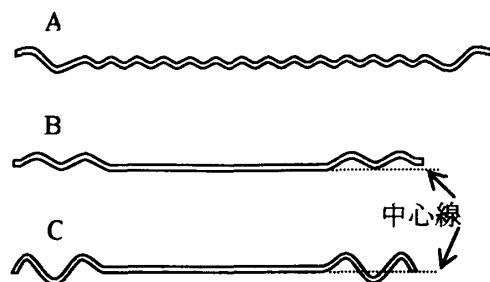


図-1 鋼繊維の形状

種類の繊維長 43mm の鋼繊維について、フレッシュ性状、強度特性、施工性能および練混ぜ性能について各試験を実施し、比較検討した結果について記載する。

2. 使用鋼繊維

使用鋼繊維の形状の模式図を図-1 に示し、各繊維の機械的特性を表-1 に示す。鋼繊維 No.A は繊維長 60mm、繊維径 0.8mm、アスペクト比 75 であり、全体に波形状がある。鋼繊維 No.B, C は繊維長 43mm、繊維径 0.85mm、アスペクト比 50.6 であり、両端にフック加工を施している。ただし、No.B は長手方向の中心線の上片側のみに波形状を施している。それに対して、No.C は No.B を改良したもので、長手方向の中心線の上下両側に波形状を施している。なお、今回使用した鋼繊維は鋼繊維同士の絡まりを防止する目的で、練混ぜ段階で徐々に分散する水溶性の接着剤を用いて、23～46 本程度に結束している。

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合

使用材料一覧および使用配合を表-2 および表-3 示す。鋼繊維補強コンクリートの配合は通常土間床コンクリートに使用する一般的なものを基本とし、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ように、混和剤の添加量を調整し、決定した。なお、鋼繊維の混入量は一般的な土間床繊維補強コンクリートに添加する量である 30kg/m^3 とした。

フレッシュ試験および強度試験に用いた鋼繊維補強コンクリートの練混ぜは容量 50 リットル

表-1 鋼繊維機械的特性

No.	繊維形状		寸法 (mm)		抗張力 (N/mm ²)
	加工	断面	長さ	直径	
A	波	円形	60	0.80	1000 以上
B	両端フック 片振	円形	43	0.85	
C	両端フック 両振	円形	43	0.85	

表-2 使用材料一覧

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度： 3.16g/cm^3
水	W	水道水
細骨材	S	大井川水系産、密度： 2.59g/cm^3
粗骨材	G	青梅産、密度： 2.66g/cm^3
混和剤	SP	ポリカルボン酸系
鋼繊維	SF	密度： 7.85g/cm^3

表-3 使用配合

W/C (%)	s/a (%)	SP (C×%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SF
60	55	1.2	185	308	993	813	30

の傾胴型ミキサを用いて、全材料投入後 180 秒練り混ぜた後、鋼繊維を添加し、60 秒行った。また、ポンプ圧送性および練混ぜ性能試験に用いた鋼繊維補強コンクリートは、レディーミクストコンクリートプラントで製造されたベースコンクリートをアジテータ車 ($4.5\text{m}^3/\text{車}$) に投入後、アジテータ車のホッパーに直接鋼繊維を投入し、所定の時間、練混ぜを行った。

3.2 試験方法

(1)フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験はベースコンクリートおよび鋼繊維混入コンクリートについて、スランプおよび空気量測定試験を実施した。スランプおよび空気量測定は JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠して行った。

(2) 強度試験

強度試験は鋼繊維の特性を評価する目的で、曲げ強度試験と曲げじん性試験を実施した。曲げじん性試験は曲げ試験体に変位計を取り付けてたわみを測定し算出する試験方法である。圧縮強度試験および曲げじん性試験は JIS A 1108 および JSCE-G 552 に準拠して行われた。

曲げじん性試験の試験体の寸法は鋼繊維長が 40mm を超えるので、横 150mm×高さ 150mm×長さ 530mm の直方体とした。なお、試験体の作製は JSCE-F 552 に準拠して行われた。

(3) ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験は実施工に使用するコンクリートポンプ車（ピストン式、100m³/h）を用いて実施した。レディーミクストコンクリートプラントから運搬されてきたアジテータ車に写真-3に示すように、ベルトコンベアを用いて鋼繊維を投入し、所定の数量を投入後、90 秒間高速回転を行った。高速回転終了後、速やかにコンクリートポンプ車にコンクリートを投入した。ポンプ圧送性の評価はポンプ車の圧送圧力とした。圧送圧力はポンプ車に搭載している圧力計を用いて測定した。測定はアジテータ車ごとに 10 秒間隔で目視にて圧力計を計測し記録用紙に記録した。測定数は形状ごとに 3 車について行われた。アジテータ車 1 台のコンクリート積載量は 4.5m³である。なお、ポンプ車からの配管延長は 10m とした。



写真-3 鋼繊維投入状況

(4) 練混ぜ性能試験

練混ぜ性能試験はアジテータ車を用いて実施した。鋼繊維のアジテータ車への投入はベースコンクリートの空気量測定終了後、アジテータ車のホッパーから直接行った。投入時間は 1 袋（15kg/袋）10 秒とし、計測員が口頭で時間を指示しながら行われた。また、投入は 2 名で行い、10 秒ごと交互に行われた。写真-4 に投入状況を示す。なお、練り混ぜ時間は鋼繊維投入後、鋼繊維 No.A において、45 秒、60 秒、75 秒、90 秒、105 秒、120 秒とし、鋼繊維 No.C において 45 秒、52 秒、60 秒、90 秒とした。

練混ぜ性能の評価として、鋼繊維混入率試験を実施した。鋼繊維混入率試験は土木学会基準 JSCE-F 554 に準拠して行われた。サンプル採取は練混ぜ時間ごとに初期、中間（2m³ 排出後）、後期（4m³ 排出後）の 3 回行った。採取したサンプルは、空気量測定用の容器（7,000ml）を用いて、JIS A 1128 に準拠して詰め込み、サンプルの容量を確定した。1 回のサンプル採取で 2 回の洗い出し試験を実施した。鋼繊維の洗い出しはコンクリートシュートの内側にマグネットシートを設置し、その上でコンクリートを水で洗い流し、鋼繊維のみマグネットシートに付着させて採取した。採取した鋼繊維をドライヤーで乾燥した後、質量を計測し、混入率を算出した。なお、練り混ぜ性能試験は鋼繊維 No.A および No.C について実施した。



写真-4 鋼繊維投入状況

4. 試験結果および考察

4.1 フレッシュ試験

表-4 にフレッシュ試験結果を示す。No.A を用いたコンクリートのスランプの低下は 3.5cm に対して、No.B および C の低下は 1.5cm, 2.0cm であった。今回の試験は全て同一の配合を用いていることから、鋼繊維の寸法の違いによりスランプロスに差異が生じている。既往の研究¹⁾から、繊維長が長くなることにより繊維同士の絡み合いの度合いが増加し、スランプは減少していると考えられる。加えて、今回使用した鋼繊維の形状による効果も挙げられる。No.A の形状は全体的に波形状である。No.B, C は両端部に大きな波形状があるだけで、全体的に直線形状であり、これにより、No.A はコンクリート中のペーストの拘束力が増加し、大きなスランプロスの原因になったと考えられる。

空気量の増加は No.A において、1.2%, No.B, C において、0.5, 0.6% であった。この結果は繊維同士を結束している接着剤が影響をおよぼしていると考えている。No.A に使用している接着剤は繊維長が長いため、結束力が強固なものである。しかし、練混ぜ方法により空気を連行しやすい傾向にある。No.B, C に使用している接着剤は繊維長が短いため、低強度の接着剤を使用できる。この接着剤の利点は空気を連行しにくい傾向にあることである。よって、鋼繊維長を減少することにより、低強度の接着剤を使用できることになった。

表-4 フレッシュ試験結果

No.	繊維長 mm	鋼繊維投入前		鋼繊維投入後	
		スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
A	60	18.0	4.7	14.5	5.9
B	43	18.0	4.4	16.5	4.9
C	43	18.0	4.5	16.0	5.1

4.2 強度試験

図-2 に各鋼繊維を用いたコンクリートの最大曲げ強度を示し、図-3 に荷重たわみ曲線から算出した曲げじん性係数を示す。曲げ試験結果は各鋼繊維を用いたコンクリートについて 4 体の試験結果の平均としている。最大曲げ強度の結果は No.C が一番高い値を示した。既往の研究²⁾から繊維長が長くなることにより、曲げ強度は増加する。No.A は No.C と比較して、17mm 長いので、通常 20%程度曲げ強度が増加するが、No.C の両端フック形状がコンクリートに対する抵抗を増加させ、曲げ強度を増大させたと考える。また、試験後の試験体は断面の観察から、No.A は鋼繊維の途中から切断されているものが多く観察されたのに対して、No.C はほぼ伸びて引き

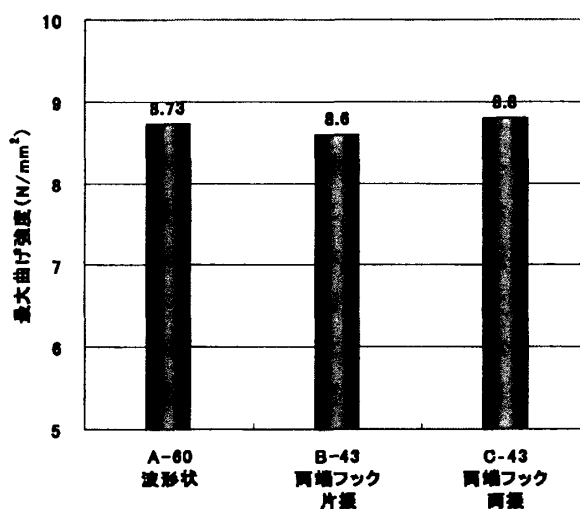


図-2 最大曲げ強度

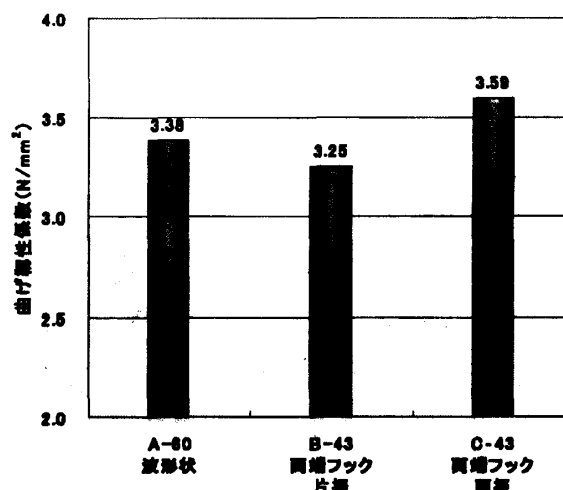


図-3 曲げじん性係数

抜かれているものが多く確認された。No.B と C を比較した場合は、最大曲げ強度は No.C が B を上まわっている結果となった。両者ともほぼ同一形状であるが、No.B のフック形状が長手方向の中心線に対して、上下両振り構造になっているので、コンクリート中のマトリックスとのかみ合わせ領域³⁾が増加し、ひび割れ発生から最大荷重に至るまで、鋼繊維の架橋効果が適切に作用したものであると推測される。つまり、マトリックスと鋼繊維の噛み合わせを工夫することにより、鋼繊維の使用効果が向上することが確認できた。

曲げじん性係数は荷重と試験体の変位から算出している。算出した曲げじん性係数は変位 3mm までのものである。全体的に前述した最大曲げ強度と同様な傾向を示している。さらに、曲げ強度試験と同様に両端フック形状が良好であることが判断できる。

4.3 ポンプ圧送試験

ポンプ圧力試験結果を図-4に示す。配管距離 10m において No.A および No.C のポンプ圧力の平均は 1.28MPa および 1.08MPa であり、No.C のポンプ圧力は No.A と比較して 0.2MPa 低い結果となった。No.C の繊維長は No.A と比較して 17mm 短いので、は配管内での繊維同士の絡み合いが減少し、また、配管径に対して繊維長が短いので抵抗が低減できたと考えられる。加えて、今回のポンプ圧送試験において、目視観察した結果、No.C は全体的にスムーズな圧送を行っているのに対して、No.A は配管の脈動が生じやすく、写真-5に示すように配管内で鋼繊維同士が絡み合い、閉塞を誘発する原因と考えられる。

鋼繊維長を短くすることにより、脈動や閉塞を誘発することが低減でき、安定的なポンプ圧送が期待できる。また、ポンプ車や配管への負担が低減されと考えられる。

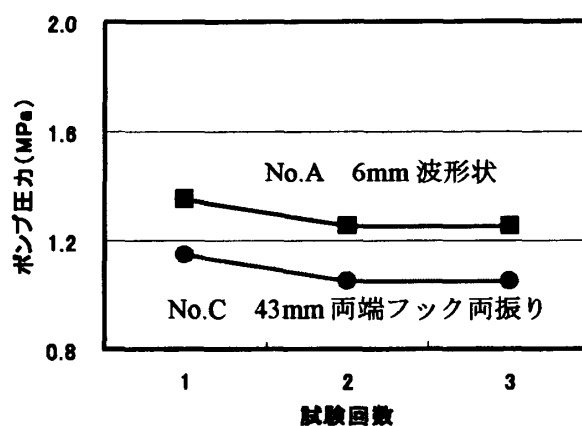


図-4 ポンプ圧力

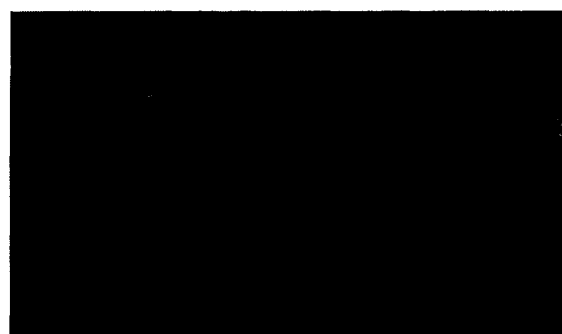


写真-5 配管閉塞状況

4.4 練混ぜ性能試験

図-5、6に鋼繊維の練混ぜ時間による混入率を示す。No.A は練混ぜ開始後 75 秒前後で No.C は練混ぜ開始後 60 秒で鋼繊維が均一に混入しているように認められた。そこで、各測定時間の初期、中期、後期の混入率を 1 つの母集団として算出し、各時間のバラつきの評価とした。その結果を図-7に示す。その結果、No.A は 75 秒で混入率の標準偏差は安定しておらず、90 秒で安定していることが確認できた。また、No.C の練混ぜ時間は 60 秒で標準偏差 0.01kg/m³ となり、90 秒においても同様な結果となった。これらより、No.C は No.A と比較して 20%程度練混ぜ時間が短縮できることが確認できた。

鋼繊維の繊維長が短くなり、繊維同士の絡み合いが低減できることにより、練混ぜ時間の短縮が可能になった。加えて、アジテータ車の回転時間が短縮することにより、環境への影響も低減できたと考えられる。

5. まとめ

鋼繊維の形状を変更することにより、鋼繊維長、フレッシュ性状、強度特性、ポンプ圧送性および練混ぜ時間等に及ぼす影響について、以下にまとめる。

- (1) 繊維長を 17mm 減少し、形状を波形状から両端フック形状に変更することにより、繊維同士の絡み合いやペーストの拘束を低減できるので、スランプロスは減少した。
- (2) 繊維長を 17mm 減少することにより、低強度の接着剤を使用することが可能になり、空気を連行しにくい傾向になった。
- (3) 鋼繊維の両端を両振りフック形状にすることにより、コンクリートに対する定着効果が増加し、繊維長が短くても曲げ強度、曲げじん性係数が増加することが確認できた。
- (4) 繊維長が短くなることにより、スランプロスが低減でき、配管径に対する繊維長の割合が小さいので、ポンプ車および配管の抵抗が低減でき、施工性は向上した。
- (5) 繊維長を短くすることにより、練混ぜ時のコンクリート中の分散性が改善され、練混ぜ時間の短縮が可能になった。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用、オーム社、pp125
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用、オーム社、pp87
- 3) 牛田耕梧ほか：鋼繊維の形状が高流動・高強度補強コンクリートに及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp273 - 278, 2004
- 4) 牛田耕梧ほか：鋼繊維のフック形状が高流動・高強度補強コンクリートの物性に及ぼす影響、土木学会第 59 回年次学術講演会, 5 - 500, pp1007 - 1008

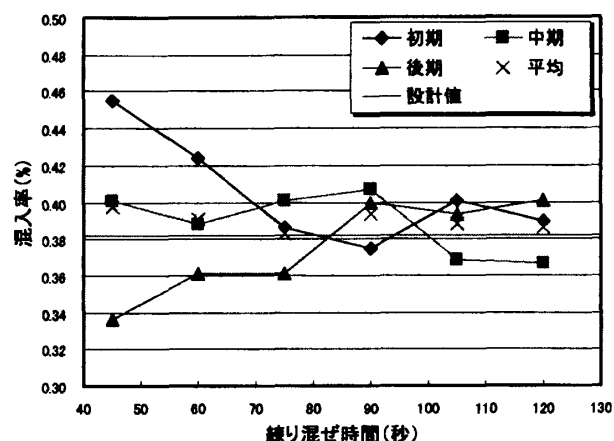


図-5 鋼繊維 No. A 練混ぜ時間による混入率

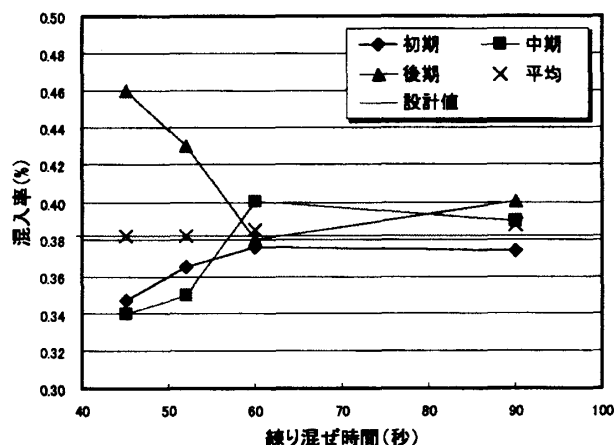


図-6 鋼繊維 No. C 練混ぜ時間による混入率

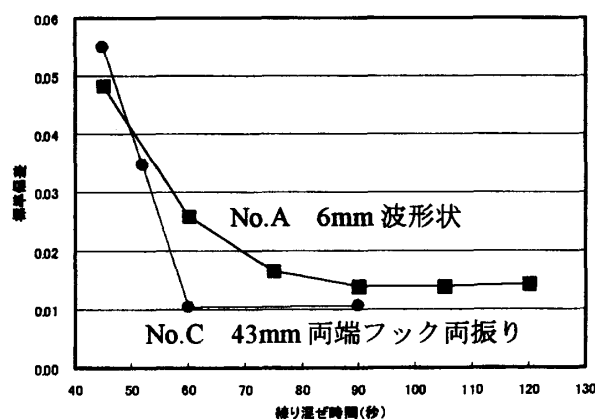


図-7 測定時間ごとの標準偏差