

論 文

[1184] 鋼纖維の形状・纖維長および粗骨材最大寸法が SFRC の曲げ強度、せん断強度および乾燥収縮に及ぼす影響

正会員 河野 清（徳島大学建設工学科）

正会員○佐々木啓次（徳島大学大学院）

須田順一郎（鴻池組土木技術部）

鈴木 信（イゲタ鋼板開発部）

1. はじめに

鋼纖維補強コンクリート（SFRC）は、コンクリートの曲げ強度、せん断強度、韌性、ひびわれ抵抗性、耐衝撃性等を改善することができるといった長所をもっているが、従来のせん断ファイバーでは、練り混ぜの際にファイバーボールが生じ易いという欠点がある。そのため、纖維長30mmの場合、粗骨材最大寸法は纖維長の半分である15mm程度が補強効果上好ましいとされている〔1〕。しかし、SFRCの舗装板への利用を考えた場合、耐摩耗性や乾燥収縮をも考え合わせてみると、粗骨材最大寸法が15mmというのは適切であるとは言えない。そこで、本研究では、最近開発された断面が偏平で凸型であり、纖維長の長い新形状鋼纖維〔2〕を用いたSFRCにおいて、纖維長と粗骨材最大寸法とが曲げ強度、せん断強度に及ぼす影響、および纖維長を変えたときの曲げタフネス、乾燥収縮などについて実験的検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

実験に使用した材料を表-1に、コンクリートの示方配合を表-2に示す。

表-1 使用材料

| 鋼 繊 維 | 寸 法 (mm) | 形 状 | 引 張 強 度 (MPa) |
|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 新 形 状 鋼 繊 維 | 0.20×1.25×30 0.25×2.00×40 0.25×2.00×50 0.25×2.00×60 |  | 828 |
| せん断ファイバー | 0.50×0.50×30 0.50×0.50×40 |  | 719 |
| カットファイバー | Φ0.60×50 |  | 980 |
| フックドファイバー | Φ0.80×60 |  | 1100 |
| セメント | 普通ポルトランドセメント（比重 3.15, 比表面積 3130cm²/g） | | |
| 細骨材 | 徳島県吉野川産川砂（比重 2.61, 吸水率 1.75%, FM=2.95） | | |
| 粗骨材 | 徳島県市場町産砕石（比重 2.59, 吸水率 2.28%, Ms=10~40mm） | | |
| 混和剤 | 高性能減水剤；ナフタリンスルホン酸塩系（比重 1.20） | | |

鋼纖維は、新形状鋼纖維を纖維長30mmから60mmまで4種類用意し、比較用として纖維長30、40

mmのせん断ファイバー、50mmのカットファイバーおよび60mmのフックドファイバーも使用した。なお、新形状鋼纖維の特徴としては、①偏平面の採用、②断面が凸型、③端部が波形、④断面の厚さ／幅の比率が小、などがあげられる。

配合はSFR Cの舗装板への利用を考慮して、目標スランプを 6 ± 2 cm、空気量を4%とし、水セメント比を50%と一定にした。また、纖維混入率は容積当たり1.5%とした。

表-2 示方配合

| | 骨材最大寸法 Gmax (mm) | 水セメント比 W / C (%) | 細骨材率 s / a (%) | 空気量 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | 高性能減水剤 (l/m ³) |
|---------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------|--------------------------|--------|----------|----------|-----------|-------------------------------|
| | | | | | セメント C | 水 W | 細骨材 S | 粗骨材 G | 鋼纖維 SF | |
| 纖維混入率 0% | 10 | 50 | 65 | 4.0 | 380 | 190 | 1097 | 581 | — | 0.89 |
| | 15 | 50 | 63 | 4.0 | 360 | 180 | 1092 | 630 | — | 0.84 |
| | 20 | 50 | 61 | 4.0 | 340 | 170 | 1082 | 681 | — | 0.80 |
| | 30 | 50 | 59 | 4.0 | 320 | 160 | 1071 | 732 | — | 0.75 |
| | 40 | 50 | 57 | 4.0 | 300 | 150 | 1065 | 786 | — | 0.70 |
| 纖維混入率 1.5% | 10 | 50 | 65 | 4.0 | 380 | 190 | 1071 | 568 | 118 | 0.89 |
| | 15 | 50 | 63 | 4.0 | 360 | 180 | 1066 | 618 | 118 | 0.84 |
| | 20 | 50 | 61 | 4.0 | 340 | 170 | 1058 | 666 | 118 | 0.80 |
| | 25 | 50 | 61 | 4.0 | 340 | 170 | 1058 | 666 | 118 | 0.80 |
| | 30 | 50 | 59 | 4.0 | 320 | 160 | 1048 | 717 | 118 | 0.75 |
| | 40 | 50 | 57 | 4.0 | 300 | 150 | 1037 | 777 | 118 | 0.70 |

2.2 コンクリートの練り混ぜおよび供試体作製

コンクリートの練り混ぜには強制練りミキサを用い、鋼纖維を手で散布し、3分間練り混ぜた。その後所定のはり型枠に詰め、振動台で30秒間振動締め固めを行った。打ち込んだ供試体は、翌日脱型し、所定材令28日まで湿布養生を行い各種試験を行った。なお、纖維長30mm、40mmの鋼纖維を用いたSFR Cは□10×10×40cm、纖維長50mmの鋼纖維を用いたSFR Cは□15×15×60cm、および纖維長60mmの鋼纖維を用いたSFR Cは□20×20×90cmはり供試体を作製した。

2.3 硬化コンクリートの試験方法

(1)曲げ強度および曲げタフネス試験

SFR C指針のJCI-SF4「鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」規定に従って100t万能試験機を用いて三等分点載荷法により、上記供試体を用いて行った。

(2)せん断強度試験

鋼纖維補強コンクリート設計施工指針(案)III-2-6「鋼纖維補強コンクリートのせん断強度試験方法」の規定に従って100tを用いて二面せん断により、纖維長30mmおよび40mmのものについて上記供試体を用いて行った。

(3)乾燥収縮試験

JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験法」におけるコンパレータ法の規定に従って、コンパレータを用いて、恒温室内(20°C、60%R.H.)で所定の乾燥材令におけるコン

クリートの長さ変化を、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ はり供試体を用いて測定した。

(4) 分散狀況試驗

図-1に示す位置より、 $\square 15 \times 15 \times 45\text{cm}$ はり供試体から厚さ10cmの試験片を切り出し、型枠の影響を受けないように、図-2の斜線部において、その透過X線像を画像解析処理し分散係数および配向係数を求め纖維長によるマトリックス中の新形状鋼纖維の分散状況を調査した。比較として纖維長40mmのせん断ファイバーについても行った。

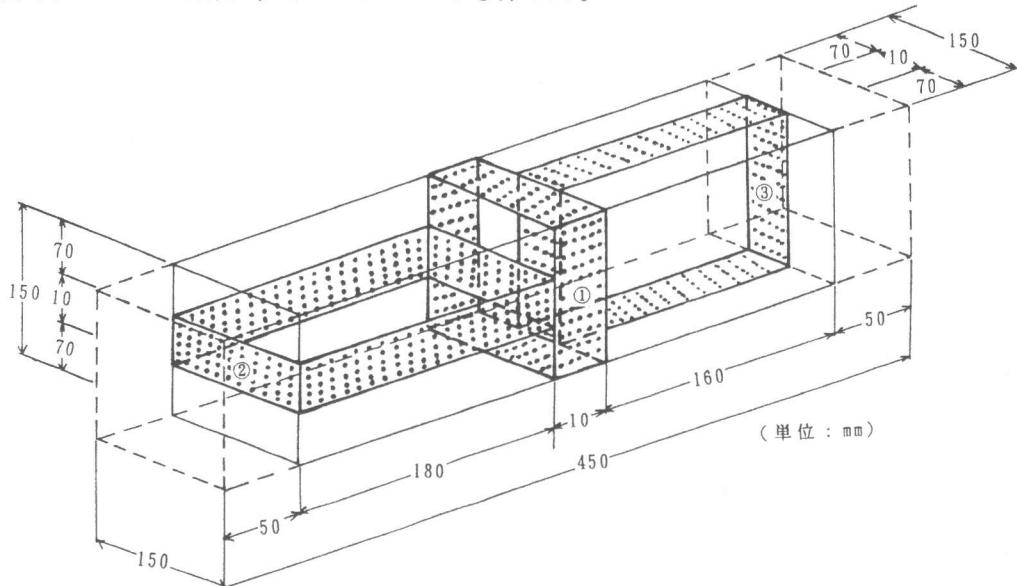


図-1 試験片採取

図-2に示すように分割したメッシュ内の鋼繊維の分散状況を示す分散係数を次式により求めた。

$$\zeta = \frac{(\sum (x_i - \mu)^2 / n)^{1/2}}{\mu} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 α ：分散係数

μ : 試料中に含まれる纖維数の平均値

n : 試料数 (メッシュ数 - n = 9)

x_{ij} : 各メッシュの試料中に含まれる繊維数

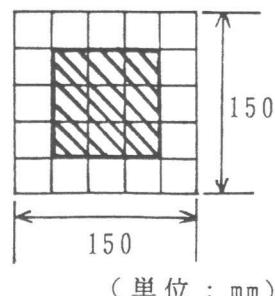


図-2 メッシュ分割

また、配向係数は、一軸方向に対する有効率として、ある方向に纖維を投影した時の長さと、もとの纖維長との比と定義し、次式により求めた。

$$\beta = \frac{t}{((1/N)^2 + t^2)^{1/2}} \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 β : 配向係数 t : 試験片の厚さ (=10mm)

—：全投影長さ N：繊維本数

a : 鋼織維の全投影面積

d : 鋼繊維の平均厚さ

新形状鋼纖維 $(0.30 \pm 0.25) \times 2 - 0.725\text{mm}$

$$共軸断面マイバー = (0.46 + 0.49) / 2 = 0.475 \text{ mm}$$

3. 実験結果および考察

3. 1 鋼纖維のマトリックス中での分散について

はり供試体から切り出した試験片の透過X線像を画像解析処理し、分散係数と配向係数を求めた結果を表-3に示す。これより、分散係数は纖維長が長くなつても差はあまりみられなかつたが、配向係数は、新形状鋼纖維の方がせん断ファイバーより小さくなつた。小林ら[3]は、纖維の型枠による拘束を考慮した理論的平均配向係数を求めているが、今回の新形状鋼纖維の結果はこの理論的配向係数0.41前後の値であり、三次元ランダムの配向状態になつてゐることがわかる。一方、せん断ファイバーの方は、ファイバーボールの生成などによつて拘束を受け、ランダムに配向されなかつたと考えられる。また、纖維長が長くなることによつても若干小さくなつた。このことより、新形状鋼纖維は配向性が改善されていることがわかる。

3. 2 曲げ強度に関する検討

S F R Cとプレーンコンクリートの曲げ強度比と粗骨材最大寸法／纖維長との関係を図-1に示す。

表-3 分散係数および配向係数

| 種類 | 纖維長 (mm) | 分散係数 | 配向係数 |
|----------|-------------|------|------|
| せん断ファイバー | 40 | 0.72 | 0.68 |
| | 40 | 0.75 | 0.43 |
| | 50 | 0.68 | 0.39 |
| | 60 | 0.74 | 0.38 |

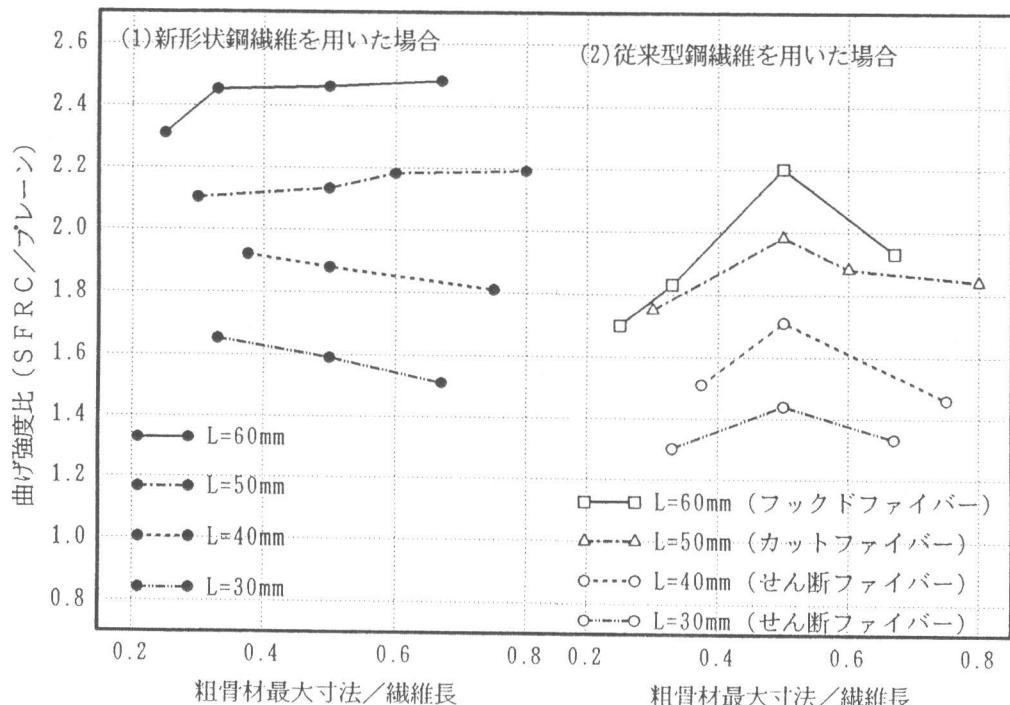


図-3 粗骨材最大寸法／纖維長が曲げ強度比に及ぼす影響

これより、まず、纖維長が長くなることによつて S F R C の曲げ強度が明らかに増大することがわかる。これは、纖維長が長くなることによつて平均埋め込み長さが長くなり、鋼纖維の引き抜けに対する抵抗が大きくなつたことなどが原因として考えられる。

形状で比較してみた場合、新形状鋼纖維の方がせん断ファイバーよりも曲げ強度は大となっている。これは、新形状鋼纖維の表面積の増加による付着強度の増加〔4〕、配向性の改善などによるものと考えられる。

また、粗骨材最大寸法／纖維長が0.5より大きくなるとせん断ファイバーは曲げ強度比が低下し、纖維長30mmあるいは40mmの新形状鋼纖維においてもその比が大きくなることによって曲げ強度比低下の傾向がみられた。しかし、纖維長50mmあるいは60mmの新形状鋼纖維では、曲げ強度比は低下傾向はみられない。

これらのことより、纖維長の長い新形状鋼纖維を用いると、粗骨材最大寸法を30mmあるいは40mmと大きくとることが可能であり、曲げ強度比も纖維長の短いものに比べて明らかに大であり、補強効果上有利であることがわかる。

3. 3 せん断強度に関する検討

纖維長30mmおよび40mmの場合のS F R Cとプレーンコンクリートのせん断強度比と粗骨材最大寸法／纖維長との関係を図-2に示す。せん断ファイバーは粗骨材最大寸法／纖維長=0.5の時にせん断強度比が最大となり、粗骨材最大寸法がせん断強度に影響を与えることがわかる。一方、新形状鋼纖維は、粗骨材最大寸法／纖維長が大きくなてもせん断強度は若干増加する傾向がみられた。このことからも、新形状鋼纖維では粗骨材最大寸法を大きくとることが可能であることがわかる。

3. 4 曲げタフネスに関する検討

纖維長40mm、50mmおよび60mmの場合のS F R Cの曲げ荷重-たわみ曲線を図-3に示す。この曲線と横座標軸によって囲まれた面積の大きさで表すタフネスは、纖維長が長くなるほど大きくなっていることがわかる。これは、纖維長が長くなることにより配向性や付着性が改善され、ひびわれを拘束する効果が大きくなるためと考えられる。なお、図中に記入したように曲げ強度も纖維長とともに明らかに大となっている。

3. 5 乾燥収縮に関する検討

プレーンコンクリートと、纖維長40mm、50mmおよび60mmの場合のS F R Cの乾燥収縮の試験結果を図-4に示す。西ら〔5〕は、纖維混入率1.5%のS F R Cは、乾燥収

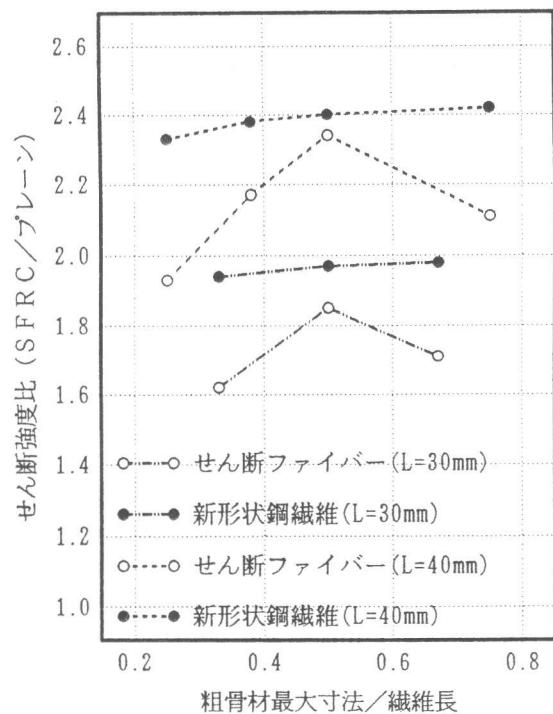


図-4 粗骨材最大寸法／纖維長がせん断強度比に及ぼす影響

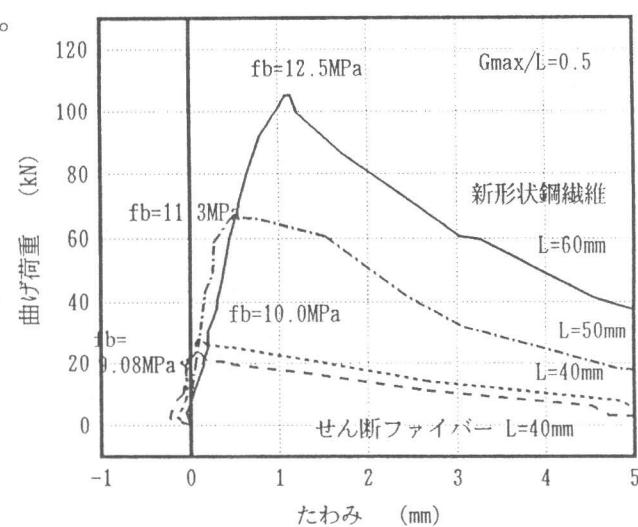


図-5 曲げタフネスに及ぼす影響

縮がプレーンコンクリートに比べて10数%低下することを示してい
るが、繊維長の長い新形状鋼繊維は、
91日の乾燥材令で30%程度も小とな
っており、乾燥収縮を低減する上で
非常に有効であることがわかる。

この原因としては、繊維によるコンクリートの変形を拘束する効果が大となったことが考えられる。また、乾燥収縮には単位水量が大きく影響してくるが、粗骨材最大寸法を大きくとることによって単位水量を少なくすることができることでも有利である。

4.まとめ

本研究の結果、新形状鋼繊維について以下のことが言える。

- (1)三次元ランダムの配向状態になり、配向性が改善される。
- (2)曲げ強度およびせん断強度を増加する上で有効である。
- (3)繊維長が長い場合、粗骨材最大寸法を大きくとることができる。
- (4)曲げタフネスを増加できる。
- (5)乾燥収縮をより低減できる。

(参考文献)

- [1] 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用ー、オーム社、1981
- [2] 河野 清・垣見 昇・鈴木 信：新形状鋼繊維とSFR施工指針、セメントコンクリート、No. 529、pp. 34-40、1991.5
- [3] 小林一輔・睦好宏史：繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形、土木学会論文報告集、No. 299、1980.7
- [4] 河野 清・須田順一郎・垣見 昇：鋼繊維の形状がSFRの性質に及ぼす影響、土木学会第45回学術講演会講演概要集、第5部、pp. 836-837、1990.9
- [5] 西 晴哉・大塩 明・曾根徳明：鋼繊維補強コンクリート、小野田研究報告、Vol. 30、No. 100、pp. 42-88、1978.10

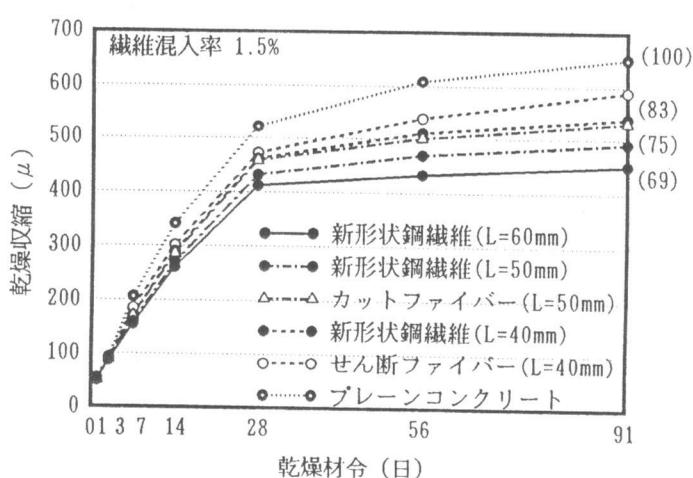


図 - 6 乾燥収縮に及ぼす影響