

# 鋼繊維補強コンクリートの引張強度に及ぼす 繊維の分散と配向の影響

Influence of Fiber Distribution and Orientation on Tensile Strength of  
Steel Fiber Reinforced Concrete

山 王 博 之\*・小 林 一 輔\*\*・富 田 強\*\*\*

Hiroyuki SANNO, Kazusuke KOBAYASHI and Tuyoshi TOMITA

## 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートの引張強度の推定に関しては現在繊維間隔説 (Fiber Spacing Concept) に基づくものと一方方向繊維強化材の強化則である混合則 (Law of Mixture) を適用する二つの基本的な考え方がある。しかし、いずれの場合も引張応力方向に有効な繊維量を与える配向係数の算出は、幾何学的にランダムであるという仮定のもとに行い、この場合はコンクリート中の繊維の分散度を全然考慮していない。

鋼繊維補強コンクリートの強度は、試験方法やその他の条件に左右されバラツキが大きいとされている。従って鋼繊維補強コンクリートの強度に影響を及ぼす諸要因の中で、鋼繊維の分散度と配向度を正確に把握することは、その強度推定上重要な問題である。

本研究は、鋼繊維補強コンクリートの引張強度をより正確に推定するために、まず、鋼繊維の分散と配向を定量的に表示する方法を検討し、これらを用いて締固め方法、繊維混入率、繊維のアスペクト比、コンクリートの配合などがコンクリート中の鋼繊維の配向と分散に及ぼす影響を明らかにした。次に、それらの諸量を複合材料の引張強度推定に用いられる一般式、たとえば混合則に導入することにより引張強度の推定を試みた。図1のフローチャートは推定の過程を示したもので、さらに上記の推定方法が有効であることを実験的に確かめた。

## 2. 引張応力方向に有効な繊維量

コンクリート中の鋼繊維の分散度と配向度に影響を及ぼすと思われる要因として、上述のように締固め方法、繊維混入率、繊維のアスペクト比、並びにコンクリートの配合などをとりあげ、それらの上記2量に対する要因効果を検討した。

\* 元大学院学生

\*\* 東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*\* 同上 第3部

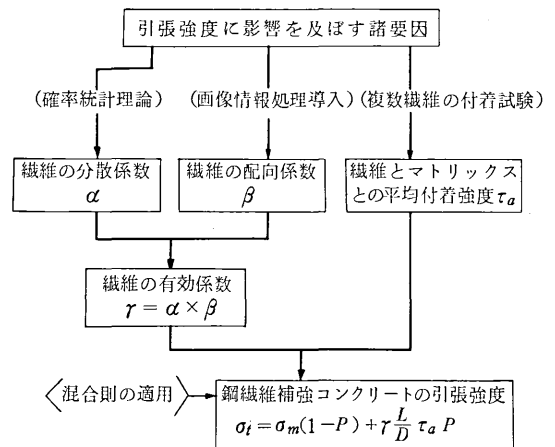


図1 鋼繊維補強コンクリートの引張強度推定のフローチャート

### (1) 鋼繊維の分散度

コンクリート中の鋼繊維の分散度の測定方法としては従来は練り混ぜの時に試料を採取し、その中に含まれる繊維量を測定する洗い試験程度しかなされていないが、これは練り混ぜ直後の鋼繊維補強コンクリート中における繊維の分散度をみるものである。しかし、試料を運搬し、打込み、締固めることによって、繊維の分散状態は変化する可能性が十分にある。また、これまでの研究ではコンクリート中の繊維の分散度はランダムであると仮定して理論展開を行い、分散の影響を鋼繊維補強コンクリートの強度の推定に對しまったく考慮していない。

ここでは、分散度も強度に関連づけて求めるために硬化したコンクリートについて、その任意断面の繊維本数を測定し、これを確率統計学的に処理し、次のような分散係数  $\alpha$  で表わした。

$$\alpha = e^{-\varphi} \tag{1}$$

ここに、 $\varphi = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n}} / \mu$ ,  $\mu = \frac{\sum x_i}{n}$ ,  $n$  = 要素

数,  $x_i$  = 要素  $2.5 \times 2.5$  cm に含まれる繊維数である。

### (2) 鋼繊維の配向度

研究速報

従来用いられている配向係数(一方向に有効な繊維長さを与える係数)には、角度のランダム変数が三次元的に等しい確率であるとして0.41, 同様な仮定で二次元的に求めて0.64, 及び球面上の面積分布の確率から求めて0.5などがあるが、これらの値は幾何学的に求まるものであって、鋼繊維補強コンクリートのように種々の要因によって繊維の配向度が異なるような材料において、そのような仮定に基づいて求めた値を用いることは現実に即していないと思われる。

本研究では、コンクリート中の鋼繊維の配向度を求めるため、まず、分散係数を求める際に用いた供試体(10×10×40cm)を引張荷重方向に直角に約10mm程度に切断し、写真1に示すようにその試験片のX線撮影を行った。次に、X線写真上の繊維像の相対面積を電子計算機による多次元画像情報処理を用いて求め、コンクリート中の鋼繊維の配向係数は最終的に式(2)を用いて計算した。

$$\beta = \cos \left( \tan^{-1} \frac{A}{\bar{n}Dt} \right) \quad (2)$$

ここに、 $\bar{n}$ は任意区間で実測した平均繊維本数、 $D$ は繊維の直径、 $t$ は試験片の厚さ、 $A$ はX線写真上の総繊維投影面積である。

この $A$ を求める方法として電子計算機による多次元画像情報処理を用いたが、それについて具体的に述べると以下のようなものである。FAX<sup>注1)</sup>より原写真(写真1)のデータを入力して、画像の濃淡の2値化を行うために写真2に示す濃淡の差分ヒストグラムをとり、どの濃度レベルで白黒に分けるべきかを決め、最終的にそれを用いて写真3のように示すような2値化を行った。

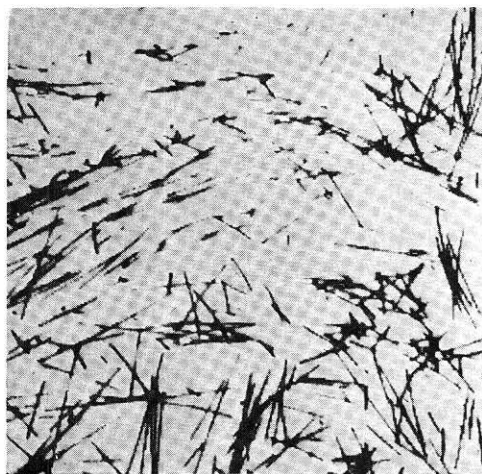


写真1 原画像例

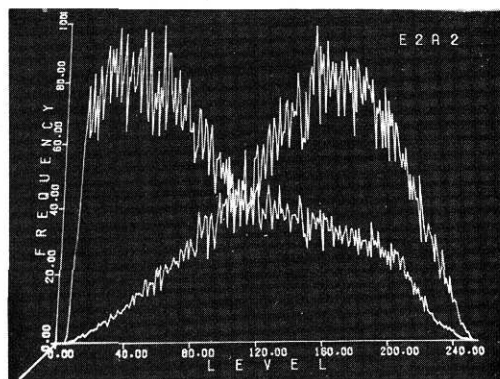


写真2 濃淡の差分ヒストグラム



写真3 2値化された写真例

(3) 有効な繊維量

(1), (2)でコンクリート中の繊維の分散係数と配向係数について別々に論じてきたが、ここでは、便宜上、分散係数 $\alpha$ と配向係数 $\beta$ との積をとって引張応力方向に有効な繊維量を与える係数とし、これを有効係数と定義した。

本実験においてコンクリート中の繊維の分散と配向に影響を及ぼす要因として取上げた締め固め方法、繊維混入率、繊維のアスペクト比、並びにコンクリートの配合と $\alpha$ ,  $\beta$ および $\gamma$ の諸係数との関係をそれぞれ図2, 図3, 図4, 並びに図5に示す。これらの図より、硬化したコンクリート中の鋼繊維の分散度と配向度は上記の要因により相当に異なることがわかる。たとえば有効係数に対する繊維のアスペクト比の影響については、アスペクト比が小さいと繊維の分散係数は大きい一方、繊維の配向係数は小さくなり、有効係数で表わすと両者が相殺されてアスペクト比50程度のものが最も大きい値を示す。

注1) 画像を走査して画素に分け、その濃淡をデジタル化する入力装置

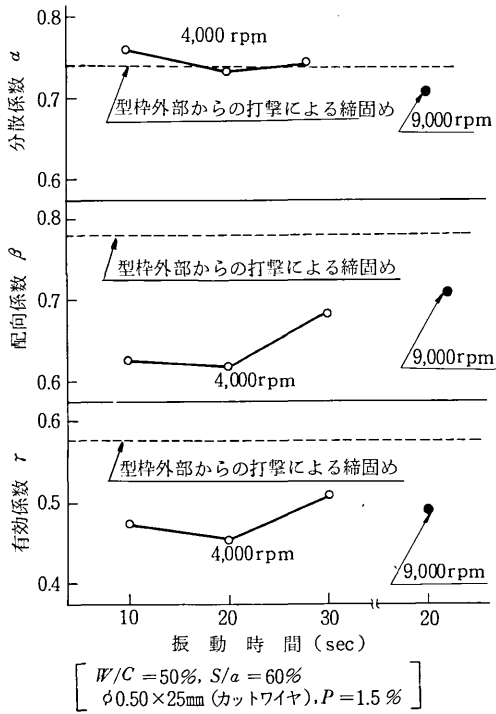


図2 諸係数と締固め方法

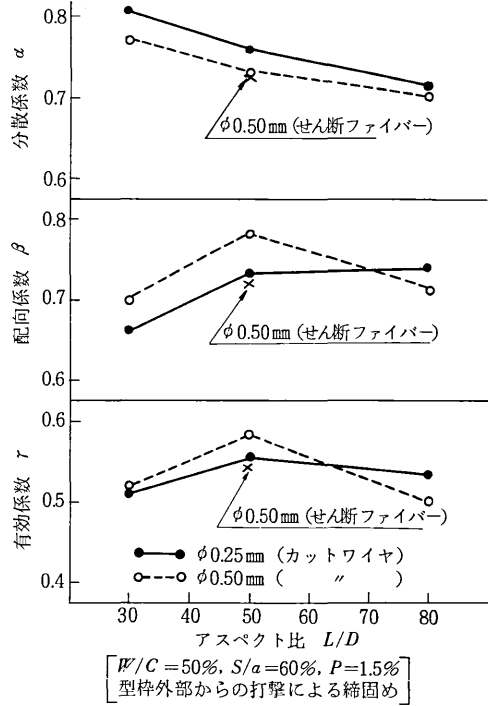


図4 諸係数とアスペクト比

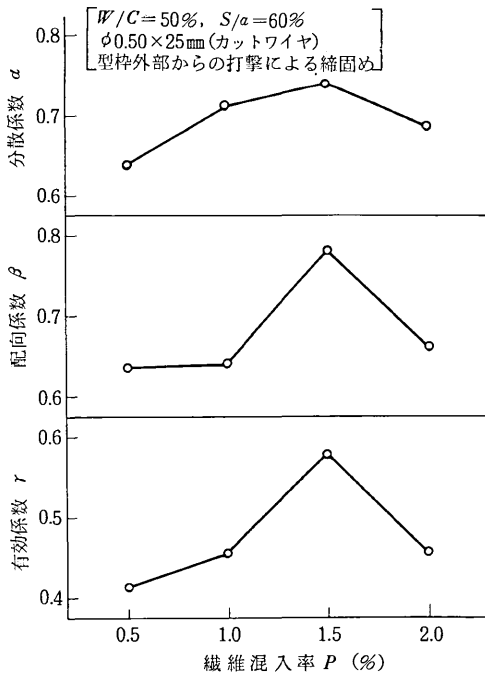


図3 諸係数と繊維混入率

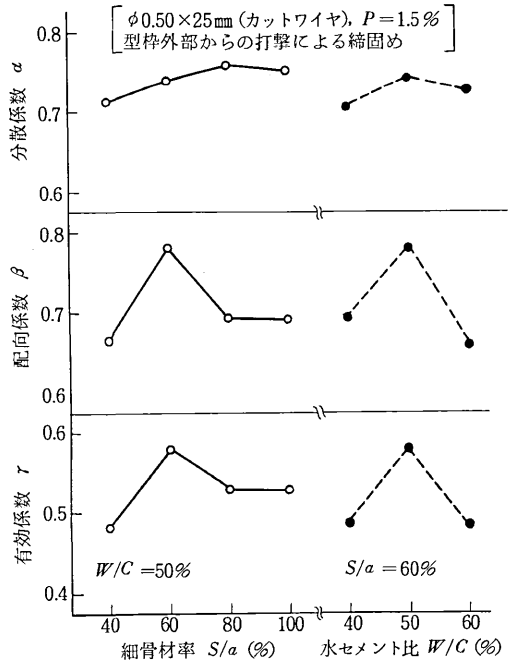


図5 諸係数とコンクリートの配合

### 3. 鋼繊維の附着強度

鋼繊維補強コンクリートの引張強度は、一般に繊維とマトリックス界面における附着強度を増すことと荷重方

向に繊維を配向することによって増大させることができる。

従来の鋼繊維の附着強度は、一般に単繊維の引抜き試験によって測定されているが、この方法による試験値の

研究速報

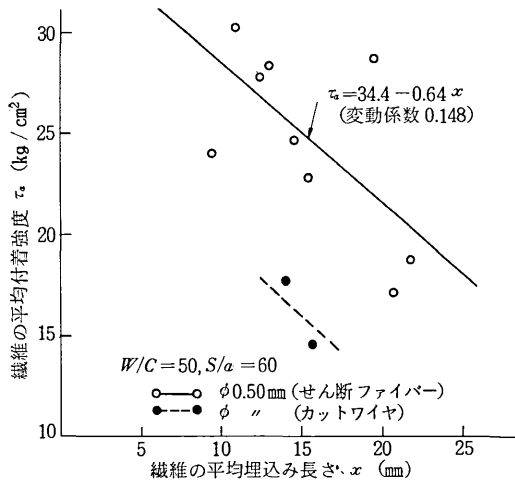


図6 繊維の平均付着強度と繊維の平均埋込み長さ

バラツキが大きいことが示されている。

本実験では、付着強度を複数の繊維（9本）を埋込んだ供試体を用いた試験方法で測定した。図6は繊維の平均付着強度と繊維の平均埋込み長さとの関係を示したものである。これより繊維の平均埋込み長さが15mm程度（φ 0.50mm, せん断ファイバー）で繊維の平均付着強度は約25 kg/cm<sup>2</sup>程度であることがわかる。

4. 鋼繊維補強コンクリートの引張強度の推定

鋼繊維補強コンクリートの引張強度は一般に、繊維混入率、繊維の分散度および配向度、コンクリートの引張強度、並びに鋼繊維の形状特性と品質などによって支配されるが、ここでは上記要因のうち、一次要因であると考えられる繊維の分散度、配向度、並びに繊維とマトリックスとの付着強度を一方向繊維強化系複合材料の強化則である混合則に導入することにより引張強度の推定を行った。ただし、上記の推定に当り次のような仮定を設けた。

- 1) 引張荷重下における繊維とマトリックスとの弾性ひずみは等しいものとする。
- 2) 複合体が破壊するとき、繊維は破断せずに引抜けるものとする。
- 3) すべての繊維はマトリックス中で真直な状態で分散しているものとする。

以上のような仮定に基づき、付着強度として本実験の方法で求めた繊維の平均付着強度  $\tau_a$  を用いるとともに、脆性マトリックス中では繊維の平均埋込み長さを  $L/4$  とすべきことを考慮して、混合則を適用し、最終的に次の式を導いた。

$$\sigma_t = \sigma_m (1 - P) + \gamma \frac{L}{D} \tau_a P \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_t$  は複合体の引張強度 (kg/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_m$  はマト

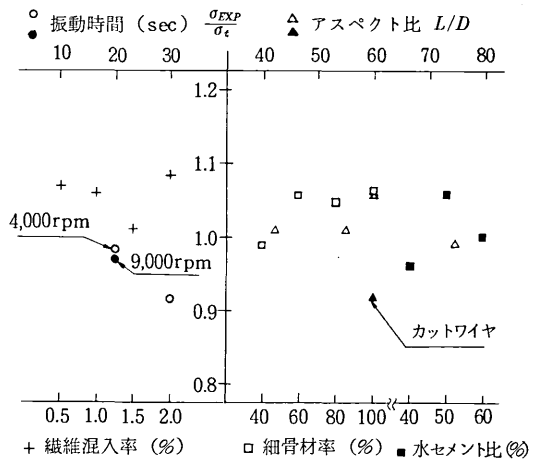


図7 実験値と理論値

リックスの引張強度 (kg/cm<sup>2</sup>)、 $P$ は繊維混入率 (%/vol)、 $\gamma$ は繊維の有効係数(分散係数 $\alpha$ と配向係数 $\beta$ との積)、 $L/D$ は繊維のアスペクト比、 $\tau_a$ は繊維の平均付着強度 (kg/cm<sup>2</sup>) である。

上記推定式(3)を用いて求めた計算値と直接引張強度試験を行って求めた実験値との関係を図7に示す。これよりこの推定方法が有効であることがわかる。

5. おわりに

以上の研究結果を要約すると以下のようなものである。

(1)鋼繊維をコンクリート中にランダムに分散せしめた鋼繊維補強コンクリートにおいては、締固めの条件、繊維混入率、鋼繊維の形状寸法、コンクリートの配合などの諸要因の変化によって鋼繊維の分散度と配向度は相当に異なることが明らかになった。

(2)コンクリート中における鋼繊維の分散度を定量的に把握する手段としては指数関数を導入して求めた「分散係数」を用いる方法が有効であると思われる。

(3)鋼繊維補強コンクリートの引張強度を推定する場合コンクリート中の引張応力方向に有効な繊維量は繊維の配向度に分散度を考慮して低減する必要がある。その低減係数として本実験の方法で求めた、「分散係数」と「配向係数」との積である「有効係数」を用いることを提案する。

(4)鋼繊維補強コンクリートの引張強度の推定に一方向繊維強化材の強化則である混合則を適用する際には、繊維の分散度、配向度、並びに繊維とマトリックスとの付着強度を導入する必要がある。

最後に、本研究を実施するに当り、X線撮影に関して多大のご協力をいただいた日本冶金工業株式会社、電子計算機による多次元画像情報処理についてご指導をいただいた本研究所の高木幹雄助教、山田博章助手に心から謝意を表します。(1976年7月1日受理)