

超高強度鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向性と架橋則の関係

筑波大学 正会員
筑波大学 学生会員

○金久保 利之
山田 大

筑波大学 学生会員 橋本 裕子
筑波大学 正会員 八十島 章

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料の引張性能は、ひび割れを架橋する繊維の引張力をひび割れ幅の関数で表した架橋則に支配される。筆者らは既往の研究¹⁾で単繊維の拔出し挙動から架橋則を構築し、引張性能評価に対する架橋則の有用性を確認した。本研究では、スチールワイヤ（比較的細径の表面が平滑な鋼繊維）を混入した 150MPa クラスの超高強度鋼繊維補強コンクリート（SFRC）を対象として、ひび割れ面における繊維の配向性を仮想的に設定し、繊維配向性をパラメータとした架橋則の構築を行うことで、繊維配向性と架橋則の関係を検討する。

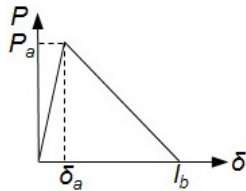
2. 架橋則の構築方法

150MPa クラスの超高強度コンクリートをマトリクスとしたスチールワイヤ（径 0.16mm, 長さ 13mm, 引張強度 2825MPa）を対象として、単繊維拔出し挙動をモデル化し、架橋則を構築する。

単繊維の拔出し挙動は、表-1に示す単繊維架橋モデルにより表現する¹⁾。架橋モデルへの入力値は、既往の研究¹⁾と同様に、既往の単繊維引抜試験結果²⁾より設定し、 $P_{a,0,l}=2.1\text{N/mm}$, $\delta_{a,0,l}=0.03\text{mm/mm}$, $f_0=2.5$, $f_l=-0.3$ とした。引抜荷重はひび割れ幅が付着長（=ひび割れ面に対する埋込長）に達した時に 0 とする。

架橋則の構築を、図-1に示すひび割れ面を架橋する繊維群に対して行う。ひび割れ幅 δ における架橋力は、単繊維の引抜荷重の総和として式(6)により得られる³⁾。 $P(\delta)$ をマトリクス断面積で除し、引張応力を得る。繊維配向性を表す繊維配向角分布は楕円関数による確率密度関数で与え、配向強度 k の値により決定される³⁾。配向強度 k の値に対応する繊維配向角分布の例を図-2 に示す。本研究では、試験体軸方向に対して平行な 2 平面から見た 2 つの繊維配向角分布を与える確率密度関数 $p(\theta)$, $p(\phi)$ は等しいと仮定し、試験体軸方向（配向角 0 度）に対する配向の強さを、配向強度 k の値によって変化させる。

表-1 単繊維架橋モデル（バイリニアモデル）

	$P_{a,0} = P_{a,0,1} \cdot l_b$	(1)	
	$\delta_{a,0} = \delta_a = \delta_{a,0,1} \cdot l_b$	(2)	
	$f = f_0 + f_1 \cdot l_b$	(3)	
	$P_a = P_{a,0} \cdot e^{f \cdot \theta}$	(4)	
$P_{ij}(\delta, \theta, l_b) = \begin{cases} \frac{P_a}{\delta_a} \cdot \delta & (\delta \leq \delta_a) \\ P_a - \frac{P_a}{l_b - \delta_a} \cdot (\delta - \delta_a) & (\delta_a < \delta) \end{cases}$			(5)

記号表	P	: 引抜荷重
	δ	: ひび割れ幅
	l_b	: 付着長 (=ひび割れ面に対する埋込長)
	f	: スナビング係数 (= $f_0 + f_1 \cdot l_b$)
	f_0, f_1	: スナビング係数を表現する定数
	θ	: 配向角
添字	$a,0,1$	: ピーク時、配向角 0 度、単位付着長あたりにおける値
	$a,0$	: ピーク時、配向角 0 度における値

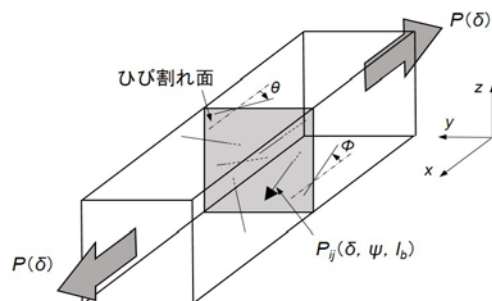


図-1 ひび割れ面を架橋する繊維群

$$P(\delta) = \sum_h \sum_i \sum_j \left\{ N_f \cdot P_{ij}(\delta, \psi, l_b) \cdot p(\theta_i) \cdot p(\phi_j) \cdot p_d(y_h, z_h) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\phi \cdot \Delta A \right\} \quad (6)$$

$$N_f = V_f \cdot A_m / A_f$$

ここで、 N_f : 繊維本数, V_f : 繊維混入率

A_m : 試験体断面積, A_f : 繊維断面積

ψ : ひび割れ面に対する繊維配向角

θ, ϕ : 軸方向に平行な平面に対して ψ を投影した配向角

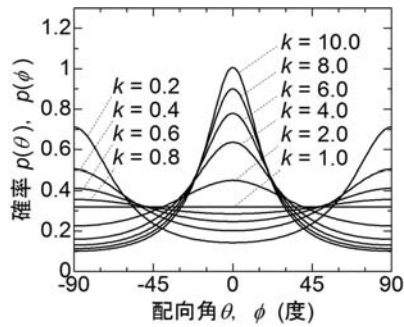
$P_{ij}(\delta, \psi, l_b)$: 単繊維の引抜荷重

$p(\theta_i), p(\phi_j)$: 繊維配向角分布を与える確率密度関数

$p_d(y_h, z_h)$: 単繊維の分布性状を示す確率密度関数 (=一様分布)

キーワード 架橋則, 繊維配向性, スチールワイヤ, 超高強度コンクリート, スナビング効果

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学 TEL 029-853-5462

図-2 配向強度 k の値に対応する繊維配向角分布

3. 繊維配向性と架橋則の関係

繊維混入率 V_f を 1.0% として、配向強度 k をパラメータとし、架橋則の構築を行った結果を図-3 に、配向強度 k の値による繊維有効率の変化を図-4 に示す。繊維有効率とは、ひび割れ面においてマトリクスから拔出しておらず、架橋力を担っている繊維（有効架橋繊維）の本数 N_{fb} の、単位体積に含まれる理論上の繊維本数 N_f に対する比である⁴⁾。配向強度 k の値が大きくなるにつれて引張応力は増大していき、 $k=6.0$ の時に最大となり、その後は徐々に低下していく。一方で、繊維有効率は $k=6.0$ 以後も配向強度が大きくなるにつれて増大しており、繊維が試験体軸方向に配向が強くなることで、ひび割れ面を架橋する繊維本数は増加していることが読み取れる。これより、配向強度が大きくなるにつれて、ひび割れ面に存在する繊維は試験体軸方向（配向角 0 度）に配向しているものが増え、ひび割れ面を架橋する繊維本数が増加する一方で、大きな配向角を有する繊維が減少することで、表-1 中式(4)で表現されるスナッピング効果（配向角による引抜抵抗力の増大効果）の影響が小さくなる。すなわち、本研究で対象としているスチールワイヤと超高強度コンクリートで構成される SFRC においては、配向強度 $k=6$ の時に、架橋性能を発揮する繊維本数が増加することによる引張応力の増加と、大きな配向角を有する繊維が減少することに伴うスナッピング効果の減少が平衡し、引張応力が最大となると考えられる。その後は配向強度が大きくなっても、配向強度の増加に伴うスナッピング効果の減少が、架橋性能を発揮する繊維本数が増加することによる引張応力の増加を上回るため、引張応力は減少していく。

4. まとめ

配向強度をパラメータとして架橋則を構築することで、繊維配向性と架橋則の関係を検討した結果、

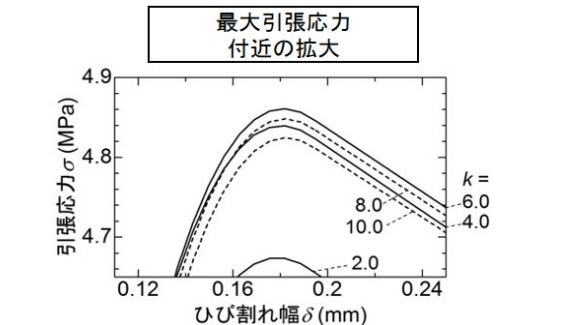
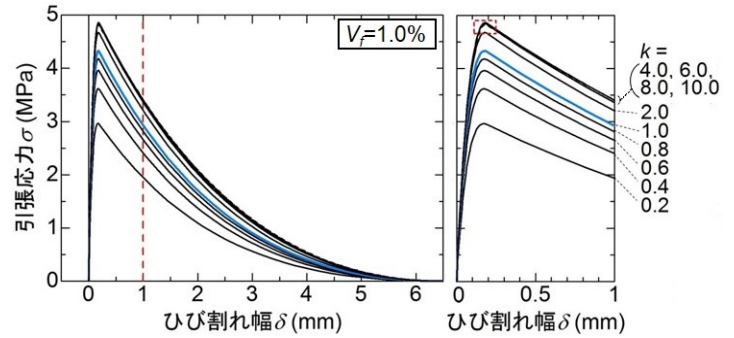
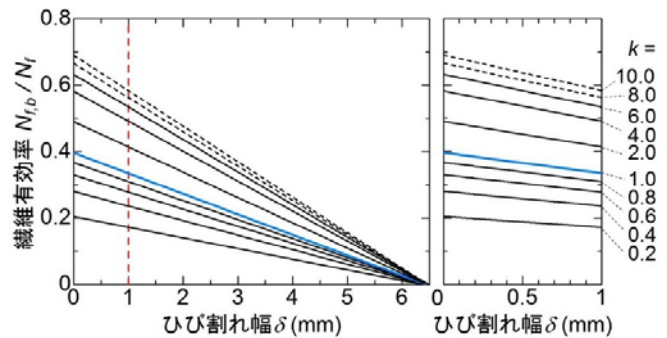
図-3 配向強度による架橋則の変化 ($V_f = 1.0\%$)

図-4 配向強度による繊維有効率の変化

本研究で対象としたスチールワイヤを使用した SFRC においては、ひび割れ面を架橋して架橋力を担っている繊維本数の増加と、配向角を有する場合の抵抗力増加が平衡する繊維配向角分布が与えられる際に、最大の引張応力が得られることが推測された。

謝辞

本研究は、科学研究助成基金基盤研究 (B) 課題番号 26289188 によっている。

参考文献

- 1) 橋本裕子ほか: スチールワイヤの拔出し挙動と架橋則の構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016.7
- 2) 橋本裕子ほか: 超高強度繊維補強コンクリートにおけるスチールワイヤの拔出し挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8
- 3) 浅野浩平, 金久保利之: HPFRCC における繊維の配向性が引張性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 692 号, pp.1673-1678, 2013.1
- 4) 浅野浩平, 金久保利之: 高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性を考慮した架橋則に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.185-186, 2014.9