

収束型アラミド単繊維の拔出しモデルと架橋則の計算

筑波大学 正会員 ○金久保 利之
筑波大学 学生会員 Wang Jin
東京地下鉄株式会社 越前 沙紀

1. はじめに

繊維補強セメント複合材料 (FRCC) では、ひび割れ発生後に繊維がひび割れを架橋することで引張性能が向上する。架橋性能を表す構成則として、引張応力-ひび割れ幅関係で示される架橋則がある。架橋則は単繊維の拔出し挙動モデルから構築され、単繊維の拔出し挙動は、繊維-マトリクス間の付着性状および繊維の配向角に影響されると考えられている。本研究では、収束された太径のアラミド繊維を対象とし、2種類の配向角のつけ方を模擬した引抜き試験の結果から拔出し挙動をモデル化して架橋則を計算する。

2. 引抜き荷重-すべり量関係のモデル化

引抜き試験の結果より、引抜き荷重-すべり量関係をバイリニアモデルでモデル化する。

配向角 0 度の試験体の平均化曲線の最大荷重と付着長 l_b の関係を図-1 左図に、最大荷重時すべり量と付着長の関係を図-1 右図に示す。それぞれ最小二乗法によって近似線を求め、式を図中に示している。最大荷重と付着長には比例の関係がみられ、比例係数を単位付着長あたりの最大荷重と定義する。配向角 θ における単位付着長あたりの最大荷重を $P_{max,\theta}$ で表すこととする。

配向角を有する試験体の平均化曲線の最大荷重と付着長の関係を、埋込角による試験体について図-2 左図に、設置角による試験体について図-2 右図に示す。どちらの配向角の試験体においても比例関係がみられ、それぞれの配向角に対して $P_{max,\theta}$ を求めた。

$P_{max,\theta}$ と配向角の関係を図-3 に示す。左図は埋込角によるもの、右図は設置角によるものを示している。両者において配向角と最大荷重に明瞭な関係は確認できず、スナビング効果は確認できなかった。したがって、任意の配向角における最大荷重 P_{max} を、配向角 0 度より得られた次式で表す。

$$P_{max} = P_{max,0} = 8.00l_b \quad (1)$$

最大荷重時のすべり量についても配向角 0 度より得られた次式で表す。

$$s_{c,max} = 0.084l_b^{0.64} \quad (2)$$

バイリニアモデルにおける負勾配の荷重消失点のすべり量は、繊維が完全に抜けきったときに荷重が 0 となることから、付着長と等しいとする。

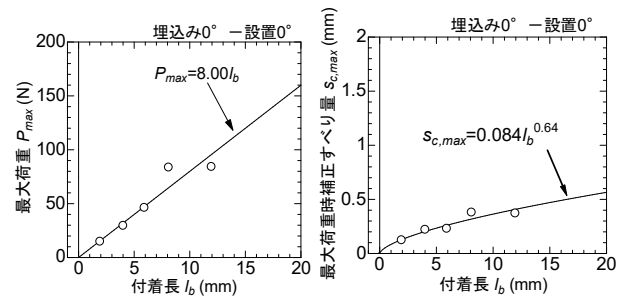


図-1 配向角 0° における最大荷重・最大荷重時すべり量と付着長の関係

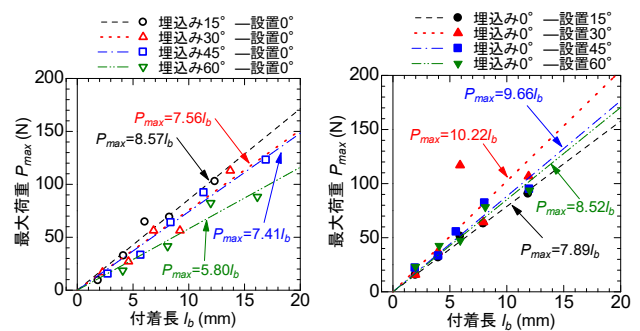


図-2 最大荷重と付着長の関係 (左: 埋込み角, 右: 設置角)

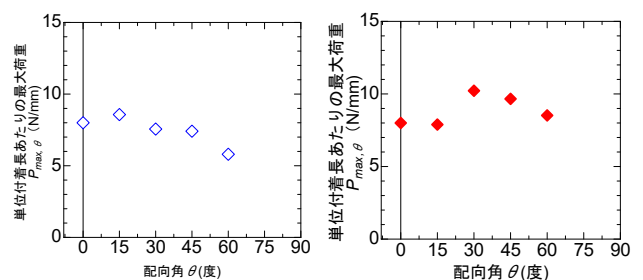


図-3 単位付着長あたりの最大荷重と配向角 (左: 埋込み角, 右: 設置角)

キーワード FRCC, アラミド繊維, 拔出し挙動, 引抜き試験, 架橋則

連絡先 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学 TEL 029-853-5045

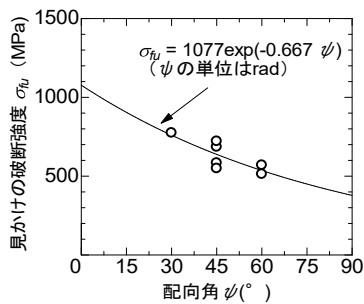


図-4 配向角による繊維強度の低減

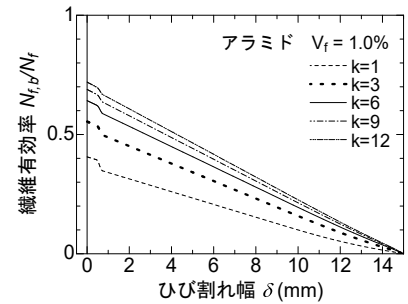
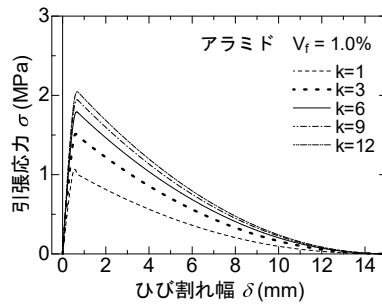


図-5 引張応力・繊維有効率—ひび割れ幅関係

3. 架橋則の計算

既往の研究^[1]と同様に、架橋則の計算を行う。最大引抜き荷重時ひび割れ幅は最大引抜き荷重時すべり量の1.5倍とし、次式で表す。

$$\delta_{\max} = 1.5s_{c,\max} = 0.13l_b^{0.64} \quad (3)$$

引抜き試験において、試験体厚さ8mmで埋込み角60度、および試験体厚さ12mmで埋込み角30度、60度の一部の試験体において繊維の破断が確認されたため、見かけの破断強度を求めた。繊維の破断が確認された試験体の最大引抜き荷重を繊維断面積で除した破断強度と配向角の関係を図-4に示す。近似式の切片である1077MPaを配向角0度における見かけの繊維強度 σ_{fu} 、係数0.667を繊維強度低減係数 f' とし、見かけの破断強度を次式で表す。

$$\sigma_{fu} = 1077 \cdot e^{-0.667\psi} \quad (4)$$

配向強度 k 以外の架橋モデルの入力値を表-1に示す。繊維長は30mm、繊維混入率 V_f は1.0%とした。主配向角 θ_r は、試験体軸方向に平行な2平面に対して、主たる配向が軸方向にあるものとして $\theta_r=0$ とする。

配向強度 k をパラメーターとした架橋則の計算結果を図-5左図に、繊維有効率とひび割れ幅の関係を図-5右図に示す。繊維有効率とは、ひび割れ面においてマトリクスから抜け出しておらず、破断もせずに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。

配向強度 k が増大すると引張応力も増大する。図-5右図の繊維有効率を見ると、0.5~1.0mm程度の範囲で繊維有効率の負勾配が変化しており、これは繊維の破断によるものである。スナビング効果は無いものとしているため、配向強度が増大すると軸方向に配向する

表-1 架橋モデルへの入力値

入力項目		入力値
繊維断面積 A_m (mm ²)		0.196
繊維長 l_f (mm)		30
配向角0°における 単位付着長当たりのピーク時荷重 $P_{\max,0}$ (N/mm)		8
配向角0°におけるひび割れ幅関数 $\delta_{\max} = Al_b^B$ (mm)	A	0.13
	B	0.64
繊維混入率 V_f (%)		1.0
配向角0°における繊維破断強度 σ_{fu} (MPa)		1077
繊維強度低減係数 f'		0.667
主配向角 θ_r (°)		0

繊維が増え、ひび割れを架橋する繊維が単純に増加するため、繊維有効率の増加とほぼ同一の割合で引張応力も増大する。

4. まとめ

- (1) 引抜き試験結果から単位付着長あたりの最大荷重と配向角の関係を検討した。埋込み角による試験体、設置角による試験体どちらにおいてもスナビング効果を確認できなかった。
- (2) 引抜き試験結果からモデル化した単繊維の架橋モデルを用いて配向強度を変化させた架橋則の計算を行い、繊維有効率の増加とほぼ同一の割合で引張応力も増大することを確認した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費基盤研究(A)18H03802 によって行っている。

参考文献

- [1] Kanakubo, T., Miyaguchi, M., Asano, K., Influence of Fiber Orientation on Bridging Performance of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Cementitious Composite, ACI Materials Journal, Vol.113, No.2, pp.131-141, 2016