

高ひずみ速度下における繊維補強セメント複合材料の動的引張モデルに関する研究

防衛大学校 学生会員 ○長谷川 大 岩根 利浩
正会員 別府 万寿博

1. 緒言

近年、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の補強法の一つとして、繊維補強セメント複合材料(以下、FRCC)の適用について検討が行われている。静的荷重下における FRCC の力学特性に関する研究は比較的多く行われているが、高ひずみ速度下における動的力学特性やそのモデル化に関する研究は少ないのが現状である。本研究は、FRCC 供試体に対する動的一軸引張実験結果に基づいて、繊維の引抜理論を改良した動的引張特性のモデルを提案したものである。

2. 実験の概要

2.1 実験装置及び計測項目

図-1 および図-2 に示すサーボ制御式急速載荷装置と一軸引張載荷装置を用いて、急速一軸引張試験を行った。実験は静的載荷、低速載荷(0.5m/s)および高速載荷(4.0m/s)の3種類を行った。使用した円柱供試体の寸法は直径 100mm、高さ 200mm であり、一軸引張試験を行うため供試体の両端部に断面寸法 100mm×120mm、厚さ 40mm の鋼製治具をエポキシ系接着剤で固定した。円柱供試体には、引張破壊を供試体の中央に発生させるため、切欠きを設けた。荷重はロードセルを用いて、また供試体の変形は渦電流式変位計を用いて図-3 に示す要領で計測した。供試体の上部と下部に貼り付けた2枚のひずみゲージにより、ひずみを計測した。

2.2 繊維および FRCC の力学特性

ポリプロピレン繊維(以下、PP)およびポリビニルアルコール繊維(以下、PVA)の2種類を使用して、FRCC を作製した。PP および PVA 繊維の外観および力学特性を、それぞれ図-4 および表-1 に示す。PVA の引張強度は PP の約 2.0 倍、また PVA のヤング係数は PP の約 2.3 倍である。いずれの繊維も、体積比で 2% をコンクリートに混入した。以降では、それぞれの FRCC を、PPFRC および VFRC と称する。

3. 実験結果および動的引張強度特性のモデル化

FRCC の静的載荷、低速載荷および高速載荷で得られた応力～開口幅関係を図-5 に示す。静的載荷実験から、PPFRC



図-1 急速載荷装置



図-2 一軸引張載荷装置

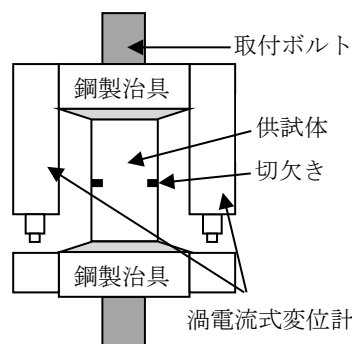


図-3 計測要領



(a) PP

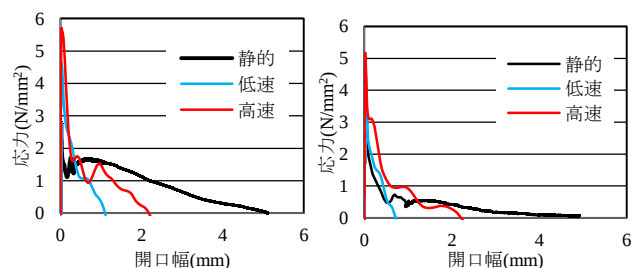


(b) PVA

図-4 繊維の外観

表-1 繊維の力学特性

種類 (mm)	直径 (mm)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)
PP	0.7	30	500	10	0.91
PVA	0.66	30	900	23	1.3



(a) PPFRC

(b) VFRC

図-5 応力～開口幅関係

キーワード：繊維補強セメント複合材料、動的引張特性、ポリプロピレン、ポリビニルアルコール

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL:086-841-3810

の引張強度および最大開口幅は、それぞれ 2.76N/mm^2 および 5.1mm となった。また、VFRC の引張強度および最大開口幅は、それぞれ 2.99N/mm^2 および 4.79mm となった。高速載荷実験から、PPFRC の引張強度および最大開口幅はそれぞれ 5.71N/mm^2 および 2.17mm となった。また、VFRC の引張強度および最大開口幅は、それぞれ 5.16N/mm^2 および 2.2mm となった。すなわち、動的載荷の場合、いずれのケースにおいても静的載荷時よりも引張強度が大きくなり、開口幅が小さくなった。引張強度の増加率～ひずみ速度関係を図-6 に示す。PPFRC の動的引張強度は、ひずみ速度 $10^{-1}/\text{s}$ において静的強度の 1.5～2 倍となった。VFRC の動的引張強度は引張強度の 1.5～1.8 倍であり、いずれも引張強度が増加している。これらの動的倍率を次式に示す。

$$DIF = \frac{\sigma_{d,PP}}{\sigma_{s,PP}} = 2.31\dot{\epsilon}^{0.06} \quad (1)$$

$$DIF = \frac{\sigma_{d,PVA}}{\sigma_{s,PVA}} = 1.91\dot{\epsilon}^{0.05} \quad (2)$$

ここに、 σ_d ：動的応力、 σ_s ：静的応力、 $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度である。

Li ら⁹⁾が提案した、コンクリート中における繊維の配置と配向を考慮したひび割れ架橋応力～開口幅関係を以下に示す。

$$\tilde{\sigma}(\delta) = g \left[2 \left(\frac{E_f d_f}{\tau L_f} \delta \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{E_f d_f}{\tau L_f} \delta \right] \left(\frac{2}{L_f} \delta \leq \frac{2\tau L_f}{E_f d_f} \right) \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}(\delta) = g \left(1 - \frac{2}{L_f} \delta \right)^2 \left(\frac{2\tau L_f}{E_f d_f} < \frac{2}{L_f} \delta \leq 1 \right) \quad (4)$$

$$g = \frac{2}{4 + f^2} \left(1 + e^{\frac{f}{2}} \right)^2 \quad (5)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}$ ：架橋応力、 δ ：開口幅、 E_f ：ヤング係数、 d_f ：繊維直径、 τ ：付着係数、 L_f ：繊維長、 δ ：開口幅、 f ：スナッピング係数である。このモデルに対して、ひずみ速度の増加に伴う強度増加については DIF を式(3)、(4)へ乗じ、最大開口幅の低下については係数 γ を用いて表す。なお、理論による最大開口幅は繊維長の半分となるが、実験では繊維長の 20～30%であったので、この不整合を調節するパラメータとして係数 α を導入した。提案する動的引張モデルを以下に示す。

$$\tilde{\sigma}(\tilde{\delta}) = DIF \times g \left[2 \left(\frac{E_f d_f}{\tau L_f \times \alpha \times \gamma} \delta \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{E_f d_f}{\tau L_f \times \alpha \times \gamma} \delta \right] \left(\frac{2}{L_f} \delta \leq \frac{2\tau L_f}{E_f d_f} \right) (0 \leq \alpha \leq 1) (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}(\tilde{\delta}) = DIF \times g \left(1 - \frac{2}{L_f \times \alpha \times \gamma} \delta \right)^2 \left(\frac{2\tau L_f}{E_f d_f} < \frac{2}{L_f} \delta \leq 1 \right) (0 \leq \alpha \leq 1) (0 \leq \gamma \leq 1) \quad (7)$$

式(6)および式(7)から求めた応力～開口幅関係を、それぞれ図-7 および図-8 に示す。図から、動的載荷実験の結果と理論モデルを組み合わせることにより、FRCC の動的引張特性をある程度再現できると言える。

4. 結言

FRCC に対する動的一軸引張実験と繊維の引抜理論から、動的引張特性のモデルを提案した。今後は、繊維の破断および配向角を考慮したモデルの提案を行う必要がある。

参考文献

- 1) Maalej M., Li, V. C. and Hashida, 'Design and Structural Applications of Stress-Crack Width Relations', in Fiber Reinforced Concrete, J. of Engineering Mechanics, 1995

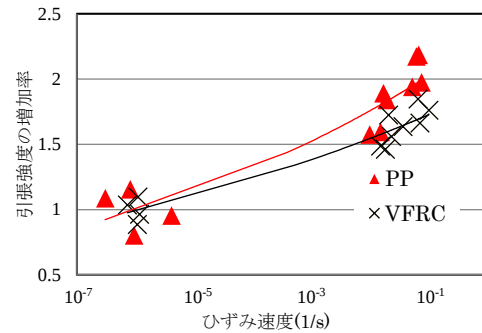


図-6 引張強度の増加率～ひずみ速度関係

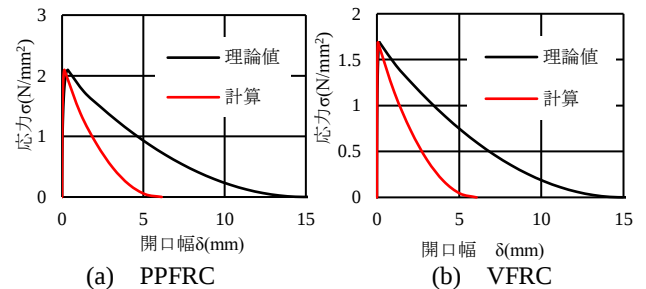


図-7 静的応力～開口幅関係

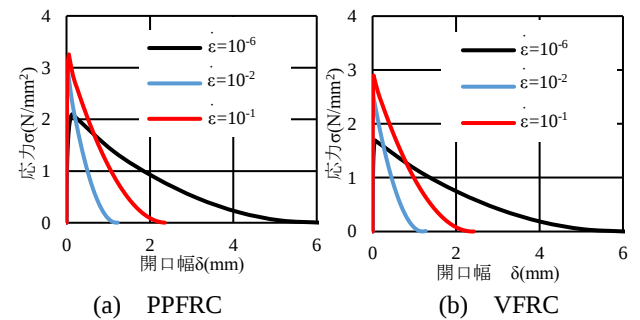


図-8 動的応力～開口幅関係