

V-347

鋼繊維補強コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化

横浜国立大学大学院 学生員 新谷 壽教

横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉

1. はじめに

本研究では、鋼繊維補強コンクリートの構成関係を、繊維とマトリックスの付着状況、繊維混入率、アスペクト比等のパラメータを考慮して構築することを目的とする。構成関係の数値モデルとしては、マイクロプレーンモデル[1]を用い、得られた数値構成モデルと実験データの比較によりモデル化の妥当性を検証する。鋼繊維は等方的に分散し、マイクロプレーンの方向、分布も等方的であると仮定する。

2. 鋼繊維補強コンクリートの特性のモデル化

鋼繊維補強コンクリートのモデル化では、単純化のために以下のことを仮定する。

(1) 載荷初期の段階では鋼繊維とコンクリートとの付着は完全である。

(2) 鋼繊維の方向はマイクロプレーンに対して垂直である。

これらの仮定に基づき、1本の鋼繊維とコンクリートとの間の付着応力-ひずみ関係をまずモデル化する。このモデル化では、載荷初期の状態においては鋼繊維とコンクリートの間のすべりはまだ生じないものとする。荷重の増加にともない、鋼繊維とコンクリートとの付着応力が最大となる点に到達し、その直後、鋼繊維がコンクリート中を滑り始めると考える。また、それ以降については鋼繊維が絶えずコンクリート中を滑り続け、この間、鋼繊維とコンクリートとの間には一定の摩擦力のみが作用しているとし、最後には鋼繊維が完全に引き抜けるとする。実際には各マイクロプレーン上に複数本の鋼繊維が存在すると考えられるため、マイクロプレーンでは鋼繊維が1本ずつ徐々に滑り出し、繊維の引き抜けが連続的に起こると仮定する。これにより、1本の鋼繊維についてモデル化した付着応力-ひずみ関係を複数本だけ重ね合わせたものを得ることができる。各マイクロプレーンにおける鋼繊維の付着特性のモデル化では、このような傾向を表わす滑らかな関数を考え、図-1に示すようなモデルを用いることにする。図-1の付着応力 (σ_N^f) とマイクロプレーンに垂直な直ひずみ (ϵ_N) の関係を表わす曲線の関数は式(1)で与えられる。さらに、マトリックスとしてのコンクリートが引張を受けるときのマイクロプレーンにおける直応力 (σ_N^m) - 直ひずみ (ϵ_N) 関係のモデル化では、式(2)の関数を用いる。

$$\sigma_N^f = \frac{2}{3} \pi F^f(\epsilon_N); F^f(\epsilon_N) = \bar{E}_N^f \epsilon_N \exp(-k_f \epsilon_N^{p_f}) \quad (1)$$

$$\sigma_N^m = \frac{2}{3} \pi F^m(\epsilon_N); F^m(\epsilon_N) = \bar{E}_N^m \epsilon_N \exp(-k_m \epsilon_N^{p_m}) \quad (2)$$

ここに、 $\bar{E}_N^f$ は付着の影響を考慮した等価繊維剛性、

$\bar{E}_N^m$ はマトリックスの剛性である。また、 k_f , k_m , p_f , p_m は材料係数である。

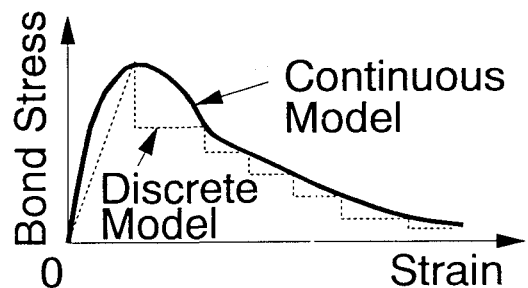


図-1 繊維の付着応力-ひずみ関係のモデル化

3. 増分形式の応力-ひずみ関係

構成モデルの定式化では、以下のことを仮定する。

仮定1：マイクロプレーン上の微視的垂直ひずみは、巨視的ひずみテンソルを座標変換した成分に等しい。

仮定2：材料内の微視的ひび割れにおける応力減少は、ひび割れと同じ方向のマイクロプレーン上の微視的

直応力を同一マイクロプレーン上の微視的直ひずみの関数とすることにより表わされる。ただし、ここでは微視的直応力をコンクリート部分と鋼繊維部分に作用するものに分けて別々に求める。

以上の基本仮定を踏まえた上で材料全体に作用する巨視的応力と材料内の微視的応力との関係を用いて、次のような巨視的応力（ σ_{ij} ）－ひずみ（ ϵ_{km} ）関係を表わす増分形式の式を求めることができる。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkn} d\epsilon_{kn}; \quad D_{ijkn} = [(D_{ijkn}^M)^{-1} + C_{ijkn}^A]^{-1};$$

$$D_{ijkn}^M = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} [F^{1/2}(\epsilon_N) V_f + F^{1/2}(\epsilon_N)(1 - V_f)] a_{ijkn} \sin\phi d\phi d\theta; \quad a_{ijkn} = n_i n_j n_k n_m \quad (3)$$

ここに、 C_{ijkn}^A は横ひずみを制御するための付加コンプライアンス、 V_f は繊維混入率、 n_i はマイクロプレーン上の外向き単位法線ベクトルの x_i 成分（方向余弦）である。材料全体の初期ポアソン比は複合則から得られる値を用いることができる。また、式(3)の表面積分の計算には、積分点が21個の数値積分法を用いる。

4. 材料係数の決定と実験データとの比較

構成モデルに含まれる材料係数の値を繊維混入率とアスペクト比(l/d)の関数として求める。まず、繊維混入率の影響を考慮するために、趙・小林[2]によって行われた一軸引張試験の応力－ひずみ曲線を用いる。この実験ではアスペクト比が54、繊維の長さが30mmのせん断ファイバーを用い、繊維混入率を0から2%の範囲で変化させている。次に、アスペクト比の影響を考慮するために、実験データとして趙・小林[3]によって行われた一軸引張試験の応力－ひずみ曲線を用いる。この実験ではカットワイヤーを用いており、繊維混入率は3.5%とし、アスペクト比を11、23、52と変化させている。これらの実験データをもとに、材料パラメータの値を決定し、式(4)の関係が得られた。また、実験データとの比較は図-2、図-3に示される。

$$k_m = k_f = 6.5 \times 10^7 - 0.027 \times 10^9 \frac{l}{d} V_f; \quad p_m = p_f = 2.0 \quad (4)$$

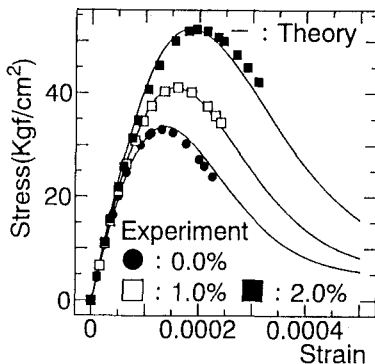


図-2 応力－ひずみ曲線と繊維混入率の関係

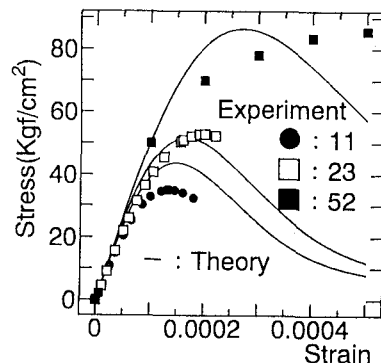


図-3 応力－ひずみ曲線とアスペクト比の関係

5. まとめ

鋼繊維補強コンクリートの応力－ひずみ関係のモデル化をマイクロプレーンモデルを用いて行った。材料パラメータ k_m 、 k_f は繊維混入率の関数になり、繊維混入率の増加によるコンクリートの引張強度の増加、付着特性の改善を表わす。また、それらはアスペクト比の関数でもあり、繊維の長さ、形状の影響を表わす。

参考文献

- [1] Bažant, Z.P., and Oh, B.H.: J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.111, No.4, pp.559-582, 1985.
- [2] 趙力采・小林一輔：コンクリート工学, Vol.17, No.9, pp.87-95, 1979.
- [3] 趙力采・小林一輔：生産研究, Vol.28, No.9, pp.20-23, 1976.