一軸引張疲労荷重下における ECC 架橋応力劣化モデルの構築

Modeling of Bridging Stress Degradation of ECC under Uniaxial Tension Fatigue Loading

北海道大学大学院工学研究科 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 角間 恒 (Ko Kakuma)
北海道大学大学院工学研究科 F会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

### 1. まえがき

ECC (Engineered Cementitious Composite) は一軸引張 応力下における擬似ひずみ効果および複数微細ひび割れ の形成により、従来の FRC (Fiber Reinforced concrete) に 比べ極めて高靭性で延性的な挙動を示す材料である<sup>1)</sup>。 また、その微小なひび割れ開口幅によりコンクリートの 耐久性に影響を及ぼす物質の透過を抑制できる。このよ うな特長を生かし、ECC は近年、社会基盤構造物の補 修・補強に用いられるケースが増加している。しかし、 ECC は比較的新しい材料であり疲労特性に関する研究 が進んでいないのが現状である。そこで、本研究は短繊 維補強複合材料の繊維引抜きモデルを元に、ECC の引張 疲労荷重下における架橋応力劣化モデルを構築し、以前 に実施された ECC 引張疲労試験の結果<sup>2)</sup>と比較を行うこ とで、モデルの妥当性を検討することを目的としている。

# 2. 架橋則

繊維引抜きモデル (Fiber Pullout Model, FPM) は短繊 維補強複合材料の基礎となる力学モデルであり、その導 出においては以下の仮定が含まれている。

- 繊維-母材間の付着強度は、摩擦によるものが支配 的である。
- 繊維強度は繊維の軸応力より大きく、破断は生じない。

しかし、これらの仮定は必ずしも実際の複合材料に合 致するものではなく、用いる繊維の種類によっては仮定 条件の拡張が必要となる。以下では、PVA (polyvinyl alcohol) 繊維を用いた PVA-ECC を想定して拡張を行っ たモデルについて述べる。

2.1 界面付着強度の変化

繊維-母材間の付着は化学付着と摩擦付着の2種類に大 別できる。PVA 繊維とともに用いられることの多い PE

衣 I 越框付住	
繊維長 L <sub>f</sub> (mm)	12
繊維径 d <sub>f</sub> (mm)	0.04
繊維弾性係数 E <sub>f</sub> (GPa)	21.8
繊維強度 σ <sup>n</sup> <sub>fu</sub> (MPa)	806
繊維混入率 V <sub>f</sub> (%)	2
摩擦付着強度 τ <sub>i</sub> (MPa)	2.01
化学付着強度 $\tau_s$ (MPa)	31.3
スナビング係数 f	0.5
繊維強度低減係数 f'	0.3

表 1 繊維特性

(polyethylene) 繊維では化学付着が無視できるほど小さ いのに対し、PVA 繊維では化学付着が強く、その影響を 考慮しなければならない。ここでは繊維-母材間の化学付 着が剥がれて摩擦付着に置き換わるという付着強度変化 の過程を、繊維の相対変位δの関数として次のように表す。

$$\tau = \begin{cases} \tau_{s} \cdot [1 - \{1 - (\delta/\delta_{0\tau})\}^{2}] \\ \tau_{i} + (\tau_{s} - \tau_{i}) \cdot Exp[\alpha_{\tau} \cdot \{1 - (\delta/\delta_{0\tau})\}] \\ \vdots \vdots \vdots \vdots \\ \delta_{0\tau}, \alpha_{\tau} は係数である。 \end{cases}$$
(1)

### 2.2 繊維の破断

PVA繊維では大きな化学付着強度に対して引張強度が 小さいため、繊維の破断について考慮しなければならな い<sup>3)</sup>。破断は繊維の軸方向引張応力が引張強度に達した ときに起きるものとし、破断した繊維は応力の伝達に寄 与しないことから破断繊維が伝達する荷重を0とする処 理を行っている。

## 2.3 繊維強度の低減

母材中の繊維は繊維表面の損傷や曲げにより、その強 度が低減されることが確認されている。この影響は繊維 の配向角度¢の関数として次のように表される。

$$\sigma_{fu} = \sigma_{fu}^{n} e^{-t^{*}\phi}$$
(2)

ここに、σ<sub>fu</sub>は見かけの繊維強度である。

## 2.4 架橋応力-開口幅関係

以上による架橋則について数値的なモデルを構築し、 架橋応力-開口幅関係 (図-1、N=1) を算出した。その結 果は、閑田らにより提案されている架橋則 <sup>4)</sup>に対して十 分な適合性を示している。閑田らの式と本モデルとの違 いは、繊維-母材間の化学付着および母材弾性係数の扱い である。前者について、本モデルでは式(1)におけるパラ メータ $\delta_{0\tau}$ および $\alpha_r$ は閑田らの式を用いてキャリブレー





図-2 応力レベル(解析結果)

ションを行った。後者について、本研究では PVA-ECC における繊維弾性係数と母材弾性係数の比から、その影響は無視してよいと考えられる。

### 3. 架橋応力劣化

### 3.1 繊維の S-N 関係

ここでは疲労荷重下での繊維の疲労破断を表す S-N 関 係を求める。架橋応力の劣化は繊維の破断、繰り返し回 数の増加に伴う界面摩擦強度の低下および繊維の引抜き により起こると考えられるが、PVA-ECC の引張疲労にお いては繊維の破断が支配的であると報告されており<sup>11</sup>、 実験においても同様の傾向が見られたことから、繊維の 破断のみに着目して架橋応力の劣化を表すこととした。 ここでは繊維の S-N 関係を、繰り返し回数 N の関数とし て次のように表す。

# $\sigma_N / \sigma_{max} = 1 - k \log N$

(3)

ここに、 $\sigma_N$  は N 回載荷時の繊維強度、 $\sigma_{max}$  は初期繊維 強度、k は係数である。なお、係数 k は次のように決定 した。鋼材は引張強度の 50%の荷重レベルにおいて、繰 り返し載荷回数が約 100 万回に達するとき破壊が生じる。 50%より低い荷重レベルでは破壊が見られなくなるが、 このレベルは疲労限と呼ばれる。こうした鋼材の S-N 関 係を参考にして、繊維の S-N 関係を表した。既往の研究 による ECC 引張疲労試験結果を再現する k は、50%で 10 万回の疲労限から求めており、k=1/10 としている。

#### 3.2 解析結果

以上から、繰り返し回数を変化させて算出した架橋応 力-開口幅関係が図-1 であり、繰り返し回数の増加に伴う 架橋応力の低下が確認できる。図-2、3 はそれぞれ解析 および実験から求められた応力レベルである。応力レベ ルとは、ある開口幅に着目したとき、その開口幅におけ る架橋応力劣化の程度を表すものであり、ある N におけ る架橋応力 $\sigma_N$  と N=1 における架橋応力 $\sigma_1$  との比( $\sigma_N/\sigma_1$ ) で表される。ここでは実験に基づき、引張ひずみ $\epsilon$ がそれ ぞれ 0.1、0.15、0.2%に対応する開口幅における忘力レベ ルを算出している。図-3 には $\epsilon$ =0.2%における実験結果を 示す。図-2 では、ひずみが大きいほど応力レベルの低下 が顕著に現れているが、これは開口幅が大きくなるほど 引抜き荷重が増加することで破断する繊維が増加してい るからであり、実験においても同様の傾向が確認されて



図-3 応力レベル<sup>2)</sup> (実験結果、ε=0.2%)

いる。図-2と図-3を比較すると、解析結果は全体的に実 験結果より大きな応力レベルを示している。本モデルで は架橋応力の劣化を繊維破断のみに着目して表したが、 繊維-母材間摩擦強度の劣化を考慮することでより実際 の挙動に即したモデルになると考えられる。さらに、ひ ずみが大きいほど両者の差は小さくなったが、開口幅が 増加し繊維の破断が生じやすくなることで、破断以外の 影響による架橋応力の低下を繊維破断で表現できている ためであると考えられる。なお、本研究では、ひずみ制 御による実験で採用したひずみに対応する開口幅が非常 に小さいことで引抜ける繊維が少なく、また、引抜きに より伝達されない応力も小さいと予想されることから、 繊維の引抜きによる影響は無視してよいと考えられる。

#### 4. あとがき

本研究では、PVA-ECC の特徴を考慮して短繊維補強複 合材料の繊維引抜きモデルの拡張を行い、新たな架橋則 と繊維の S-N 関係から算出された応力レベルと引張疲労 試験結果との比較をすることで、一軸引張疲労荷重下に おける ECC 架橋応力劣化モデルの妥当性について検討 した。解析結果からは、架橋応力の劣化が繊維破断のみ に起因するという簡便なモデルであっても、ECC の引張 疲労荷重下の挙動を概ね表現できていると考えられる結 果が得られた。しかし、本モデルでは仮定的な部分も少 なくないため、今後は繊維の破断以外の影響を考慮した より詳細なモデルの構築が必要であり、さらに、新たに 構築したモデルから再度、繊維そのものの疲労特性につ いて検討することも考えられる。

## 【参考文献】

- 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), 土木学会, 2007.
- Peerapong, S.: Fracture Mechanics based Fatigue Life Analysis of RC Bridge Slab Repair by Fiber Cementitious Material, Tokyo University, 2003.
- Maalej, M., Li, V. C., and Hashida, T.: Effect of Fiber Rupture on Tensile Properties of Short Fiber Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1995.
- (期田徹志, Li, V. C., 浜田敏裕: ビニロン繊維を用いた高靱性 FRCの材料設計と開発, コンクリート工学 年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, 1998.