

## ECCの交番疲労破壊モデルの構築

Development of Uniaxial Tension-Compression Fatigue model of Engineered Cementitious Composites

北海道大学大学院工学研究科 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)  
 北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 山田 雄太 (Yuta Yamada)  
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

## 1. はじめに

繊維補強コンクリート（以下 FRC）は韌性に富み、また、繊維と母材の性質を基に性能を設計出来るという特長を持つ。その設計自由度を生かして引張ひずみが最大8%にも及ぶ、既存 FRC の性能を大きく高めた Engineered Cementitious Composite（以下、ECC）という材料も開発されている。しかし FRC や ECC は、例えば供用期間中に数百万回という交通荷重を受ける道路橋床版の増厚などへの適用が考えられているにもかかわらず、比較的新しい材料ゆえに疲労荷重下での研究が十分に行われていない。材料と構造物の疲労設計は静的耐力に基づいて考慮されることが多いが、疲労破壊の支配的機構に基づいた材料の設計、開発と構造設計が必要とされている。そこで、本研究では ECC の交番疲労荷重下におけるモデルを構築することを目的とする。

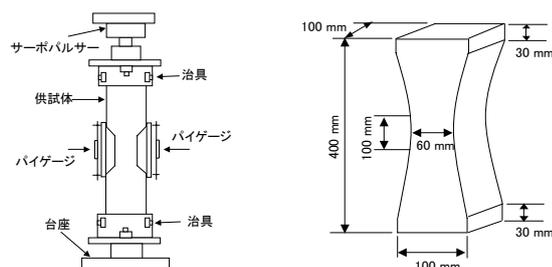
本研究ではまず ECC の一軸交番疲労荷重下挙動と劣化メカニズムについて調べた既存の研究を確認する事から始めた。一軸交番疲労荷重実験では、ECC の亀裂面において、繊維が破断されていることが確認された。つまり、繊維の破断が、架橋応力の劣化に支配的な影響を及ぼしていると考えられた。

続いて、既にモデル化されている単繊維、多繊維の引抜き挙動に加えて、繊維の破断、繊維の表面損傷による繊維の強度の低減、繊維と母材間の付着条件を考慮することにより、開口幅と架橋応力の関係をモデル化した。

最後に、繊維の疲労荷重下における破断を考慮することによる架橋応力劣化のモデル化を試みた。破断した繊維は応力を伝達しなくなることを考慮し、単繊維の応力の線形和である架橋応力の計算の際に、破断した繊維は応力を伝達しないと設定することで、架橋応力の劣化を表現した。そうして得た解析による計算結果と実験結果を比較することで、架橋応力劣化則の考察を行った。

## 2. 既存の実験

既存の実験では、図-1 に示した実験器具を用いて、5

図-1 実験器具と供試体<sup>1)</sup>図-2 供試体の寸法<sup>1)</sup>

本の供試体で行われた。供試体の物性値、寸法を図-2、表-1 に示す。また、ゲージ間は 100mm とし、変位振幅一定<sup>1)</sup> (①引張ひずみ  $\epsilon_T=0.2\%$ ～圧縮ひずみ  $\epsilon_C=0\%$ ②  $\epsilon_T=0.2\%$ ～ $\epsilon_C=0.05\%$ ) の状況下において繰り返し荷重を加えた。結果として得られた架橋応力の劣化を図-3 に示す。以下、この実験で使用した物性値を用いてモデルの拡張と構築にあたる。

## 3. モデルの拡張

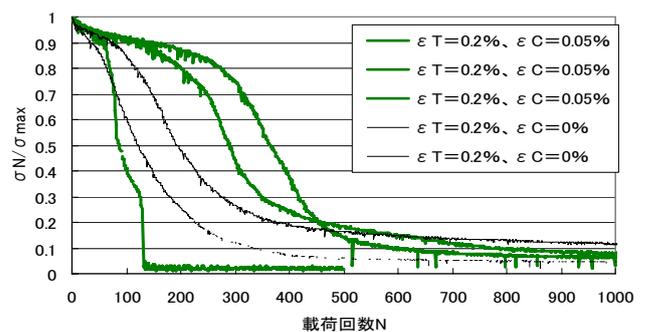
過去の研究において単繊維の引抜き挙動、多繊維の引抜き挙動について以下の仮定条件の下にモデルが構築されてきた。

- ① ひび割れは引張方向に直角な平面として生じる。
- ② 繊維はランダムに分散している。
- ③ 繊維-母材間界面剥離は、ひび割れ側から生じ、埋め込み側端部へと進展する。
- ④ 母材変形は繊維の引き抜けに比べて微小であり無視できる。
- ⑤ 繊維の弾性係数は一定。
- ⑥ 繊維のポアソン比は 0。
- ⑦ 界面付着強度は、摩擦によるものが支配的である。
- ⑧ 繊維強度は繊維の軸応力より大きく、破断は生じない。
- ⑨ 繊維表面の損傷を考慮しないとする。

以上の条件の下に構築されていたが、本研究の繊維の引抜き挙動を表現しようとするモデルの拡張が必要であった。

表-1 実験に使用した物性値<sup>1)</sup>

繊維の種類	PVA
繊維直径(mm)	0.04
繊維長(mm)	12
体積混入率(vol%)	2

図-3 交番荷重下の架橋応力の劣化<sup>1)</sup>

そこで、本研究では⑦、⑧、⑨の仮定条件を以下の3つの仮定条件に変え、モデルの拡張にあたった。

- ⑦' 界面付着は、化学付着、摩擦付着を考慮する。
- ⑧' 繊維は軸方向応力が破断強度に達したときに生じる。
- ⑨' 配向角による曲げ応力、繊維の抜け出しによる繊維表面の損傷が、繊維の強度を下げる。

以上の条件の下、単繊維引抜き挙動、多繊維引抜き挙動の順に既存のモデルに拡張した点を説明していく。また、使用した物性値は実験値と同じものであり、表-2に示す。

### 3.1 単繊維引抜きモデルの拡張

繊維は3つの段階を通して引抜きが行われる。最初の段階は、繊維が埋め込まれた状態である(図-4.Embedded)。ひび割れ面では繊維が力を伝達し、繊維の埋め込まれた部分を通して母材に力が伝達される。この状態では、繊維-母材間の界面の結合により繊維と母材は一体となっている。さらに引抜きを続けると、繊維-母材間界面の結合がひび割れ側の繊維端部から切れていく(図-4.Debonding stage)。結合が切れた部分では、界面摩擦が働くことになるが、繊維は弾性的な伸びを示すことになり、結果として $\delta$ の荷重作用点変位が生じることになる。

引抜きが続くにつれ、界面の結合は繊維の埋め込み側端部に向かって切れていき、最終的には繊維の全埋め込み長に渡って、界面摩擦が働くことになる。この時点で、繊維全体のすべり出しが始まる(図-4.Sliding stage)。荷重点作用変位 $\delta$ は繊維全体のすべり出し量に等しく埋め込み端部の長さ $l$ に等しい。 $\delta$ が埋め込み長さ $l$ と等しくなった時点で完全に引抜かれる。

以上の過程を考慮し、引抜き荷重-開口幅関係を導出すると、以下のようになる。

$$P(\delta) = \pi \sqrt{\frac{E_f d_f^3 \tau \delta}{4}} \quad \text{for } \delta \leq \delta_0 \quad (\text{Debonding stage})$$

ここに $E_f$ :繊維弾性係数、 $d_f$ :繊維径、 $\tau$ :繊維-母材間の付着強度、 $\delta_0$ :開口幅、 $\delta_0$ :剥離が終わる時の開口幅、

$$P(\delta) = \pi \tau d_f l \left[ 1 - \frac{\delta - \delta_0}{l} \right] \quad \text{for } \delta_0 < \delta \leq l \quad (\text{Sliding Stage})$$

ここに $l$ :埋め込み長さ。

以上が既存のモデルであるが、本研究では前述の過程に界面付着の条件と繊維の破断を加えた。

表-2 繊維の物性値<sup>3)</sup>

繊維の種類	PVA
繊維直径(mm)	0.04
繊維長(mm)	12
体積混入率(vol%)	2
繊維弾性係数(GPa)	21.8
繊維強度(MPa)	806
摩擦付着強度(MPa)	2.01
化学付着強度(MPa)	31.3
繊維強度低減定数	0.3
スナビング係数	0.5

繊維-母材間の付着は、化学付着と摩擦付着に大きく分けられる。まずは繊維-母材間の相対変位が進むにつれて化学付着が剥離していき、付着強度は限界値 $\tau_i$ となると、徐々に低下していく。

剥離が繊維埋め込み長さ全長に及ぶと、繊維は摩擦付着のみで抵抗するようになる。

以上の付着破壊の現象を相対変位 $\Delta$ の関数で表すと以下のようになる。

Debonding stage

$$\tau(\Delta) = \tau_s \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta}{\Delta_{0\tau}} \right) \right\} \quad (\Delta \leq \Delta_{0\tau})$$

$$\tau(\Delta) = (\tau_s - \tau_i) \text{Exp} \left[ \alpha_s \left\{ 1 - \frac{\Delta}{\Delta_{0\tau}} \right\} \right] + \tau_i \quad (\Delta > \Delta_{0\tau})$$

Sliding stage

$$\tau_0 = \tau_i$$

ここに $\tau_s$ :化学付着強度(MPa)、 $\tau_i$ :摩擦付着強度(MPa)、 $\Delta_{0\tau}$ 、 $\alpha_s$ :繊維-母材間に依存する定数。

また、破断については、引抜き荷重が軸応力より大きくなるときの、つまり以下の式で表されるときに破断を考慮した。

$$P \geq \pi \sigma \left( \frac{d_f}{2} \right)^2$$

ここに $\sigma$ :繊維強度。

上記で説明したことを考慮することで、単繊維の引抜き挙動モデルを拡張した。図-5に拡張前、図-6に拡張後の埋め込み長さ3mmの場合の引抜き荷重-開口幅関係を示す。

### 3.2 多繊維引抜きモデルの拡張

前節では、単独の繊維における引抜き荷重-開口幅関係を導いた。しかし実際のひび割れ面では多数の繊維がランダムな配置、配向で分散している。そこで、本節ではそれらを考慮し、多繊維引抜き挙動におけるひび割れ開口幅-開口幅関係を導出する。

繊維はひび割れ面に対して角度を持って埋め込まれており角度 $\phi$ の影響を受ける。また、繊維のランダム配置、配向による確率を考慮することにより、ひび割れ開口幅-架橋応力関係は以下の式で導出される。

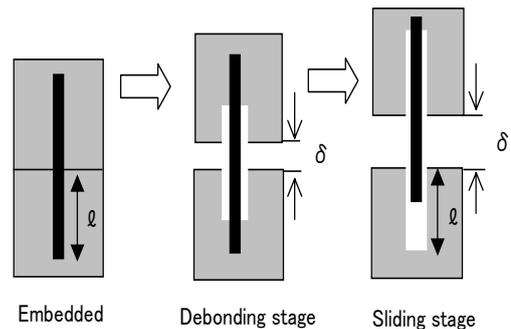


図-4 単繊維引き抜き挙動

$$\sigma(\delta) = \frac{V_f}{A_f} \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{z=0}^{\frac{L_f}{2} \cos \phi} P(\delta, \ell, \phi) p(\phi) p(z) dz d\phi$$

ここに  $\sigma(\delta)$ :架橋応力、 $V_f$ :繊維体積混入率、 $A_f$ :繊維の断面積、 $L_f$ :繊維長、 $P$ :引抜き荷重、 $p(\phi)$ 、 $p(z)$ :確率密度関数。

以上の既存のモデルに対して、本研究では、繊維の損傷と破断条件を考慮して拡張を行った。

本節では、繊維はひび割れ面に対して角度を持って埋め込まれている事を考慮している。そのとき繊維は配向角による曲げ応力、繊維の抜け出しによる繊維表面の損傷を受ける。それによって、繊維は強度の低下の影響を受ける。繊維強度の低下を以下の式に表す。

$$\sigma' = \sigma e^{-f'\phi}$$

ここに  $\sigma'$ :見かけの繊維強度、 $f'$ :繊維強度低減定数。

また、破断においては損傷の影響を受けた強度に対して前節と同様に考慮し、引抜きモデルの拡張を行った。図-7 に拡張前、図-8 に拡張後の架橋応力-開口幅関係を示す。

#### 4. 交番疲労载荷モデル

ひび割れ面において、繊維の架橋応力が荷重を伝達しているため、繊維の疲労による破断強度の低下は疲労特性に大きな影響を及ぼす。そこで本章では、繊維の応力比 ( $\sigma_N / \sigma_{max}$ ) と载荷回数  $N$  との関係述べていく。

繰り返し疲労荷重下における繊維架橋の劣化機構には、繊維の疲労破断と繊維-母材間界面付着劣化の二つの要因が考えられる。前者はひび割れ面を架橋する繊維自体が疲労により破断するという現象である。繊維内に発生する応力が繊維強度に比較して大きい場合に顕著となる。後者は繊維と母材の間の界面における界面付着強度が疲労荷重下において減少するという現象である。界面付着劣化は実験的研究によって確認されており、比較的早期に初期強度の80%まで架橋応力が減少し、その後徐々に減少して最小で50%までになることが観察されている<sup>6)</sup>。繊維内に発生する応力が繊維強度に比較して小さい場合に顕著となる。

本研究では繊維の破断は軸方向応力が破断強度に達した時に生じると仮定している。前章で破断した繊維は荷重を負担しないとして、破断していない単繊維の荷重の線形和として架橋応力を求める解析モデルを構築した。

繊維は载荷回数が大きくなる(疲労する)ことで破断する。その破断した繊維を架橋応力を求める際に線形和に加えないことで新しいモデルが構築できる。そのように繊維の破断を考慮して架橋応力劣化則を表現した。モデルを構築するにあたって前章で定義した仮定条件に、

⑩' 応力の劣化の原因となるのは繊維の破断のみであり繊維の引抜け、繊維-母材間界面の付着の劣化は原因とならない。

⑪' 圧縮応力による座屈は考慮しない。  
を加えてモデルの構築を行った。

#### 4.1 繊維の S-N 関係の式の決定

繊維は引張りには強いが圧縮力には弱いいため、圧縮力を加えた場合は S-N 曲線において 10~1000 回程度で応力比が下がる。これは既存の研究において確認できる<sup>14)</sup>。疲労限に関しては、一般的にコンクリートや金属などに単純引張疲労を加えた場合、10 万回~100 万回で応力比が 0.5 程度の疲労減を迎えることがわかっている<sup>5)</sup>。また、疲れ限度線図の考え方を参考にし、一般的に両振り疲労限は片振り引張りの疲労限の 1/2 程度となることを考慮し、以下のように S-N 曲線を定義し、傾きを決定した<sup>4)5)</sup>。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{max}} = 1 - \frac{1}{5} \log N$$

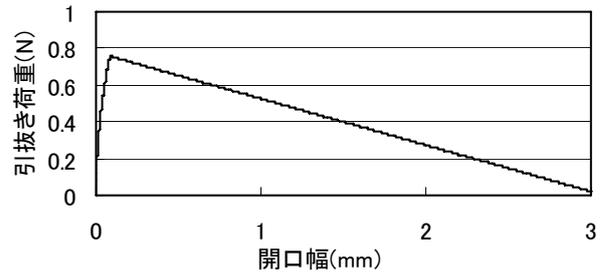


図-5 引抜き荷重-開口幅関係(既存モデル)<sup>2)</sup>

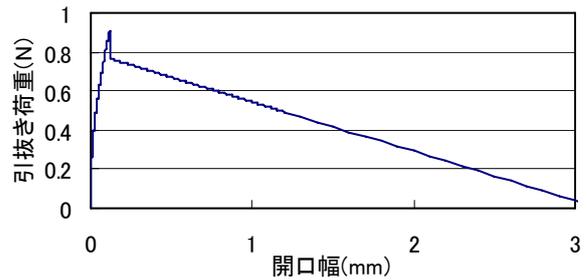


図-6 引抜き荷重-開口幅関係(拡張モデル)

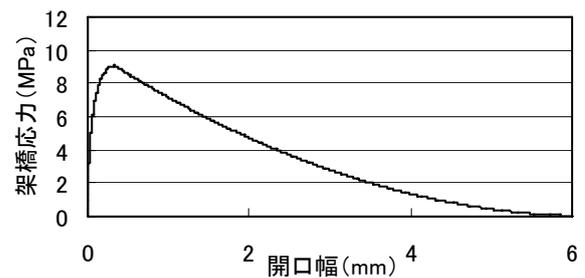


図-7 架橋応力-開口幅関係(既存モデル)<sup>2)</sup>

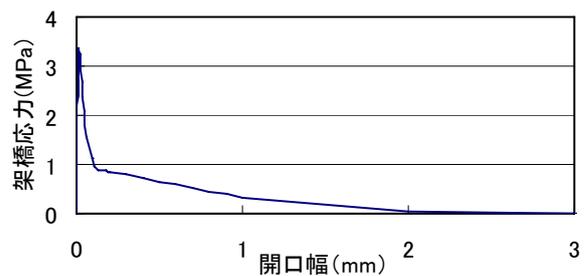


図-8 架橋応力-開口幅関係(拡張モデル)

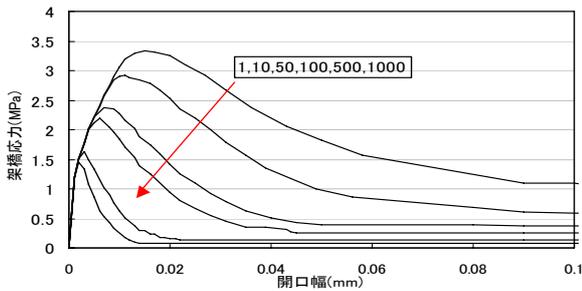


図-9 架橋応力劣化

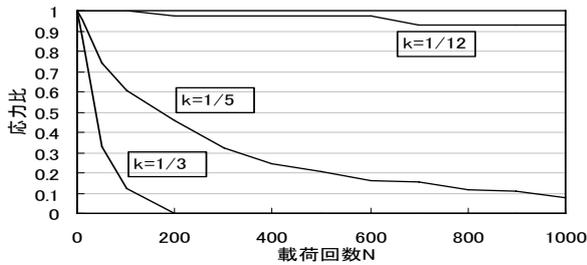


図-10 k を変化させたときの交番疲労モデル

#### 4.2 架橋応力劣化の表現

架橋応力の劣化には前節までの繊維の S-N 関係を構築したモデルに導入する事で表現している。つまり繊維が、荷重回数が増えて疲労することで破断すると、その繊維は応力を伝達しなくなると考慮し、単繊維の応力の線形和である架橋応力の和の計算には入れないことで減少を表現した。

図-9 は架橋応力劣化を表現したものである。荷重回数を増やすと、架橋応力が劣化していくことがわかる。これは疲労により繊維が破断しているためである。

#### 4.3 交番疲労モデルの構築

本節では、前節で示したグラフをひずみ一定とし、各荷重回数毎の応力をプロットする事で、交番疲労を表現した。既存の研究よりひずみ 0.2% が開口幅 0.01mm 付近となることを考慮して、各荷重回数毎の応力をプロットした。プロットした荷重回数は 1、10、50、100、200～1000 である。図-10 にそれを示す。また、ここで 4.1 節において説明した S-N 曲線の傾きである k の値が、架橋応力の劣化にどのように影響を及ぼすか表した。

図-10 を見ると、 $k=1/12$  では応力比は荷重回数 0～1000 の間に 1～0.9 程下がっている。 $k=1/5$  では 1～300 の間に大きく減少し、それ以降緩やかに減少する。 $k=1/3$  では 200 回までに急激に減少し、それ以降の応力比は 0 になっていることがわかる。これは S-N 曲線で表したように繊維が破断して応力を伝達していないことが表されている。

#### 5. 実験とモデルの比較

本章では決定した k の値を基に開口幅を 0.01mm、0.015mm、0.02mm と一定としてモデルで表現したものと実験データを比較した。結果を図-11 に示す。比較した結果、構築したモデルにおいて、荷重回数が 1～100 回間に応力比が 1～0.5 付近まで低下しており、実験データとの相違が見られた。一方 200 回～1000 回の間では応力

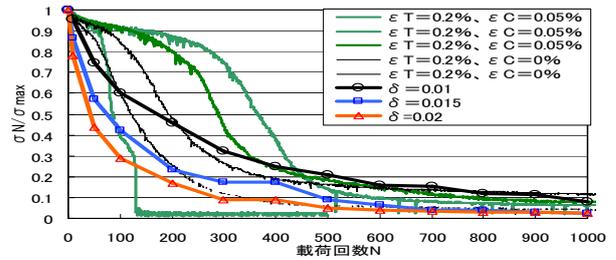


図-11 実験データとモデルの比較

比の低下は実験データと同様の挙動を示している。1～100 回の間で相違が見られたのは、実験データの不足による交番荷重の S-N 曲線の定義や、モデルにおいて、圧縮応力を加えた場合の座屈、繊維-母材間の界面付着劣化を考慮していないことが考えられる。

#### 6. あとがき

以上のように本研究では、まず既存のモデルの拡張を行い、交番荷重モデルの構築を行った。そして実験データと比較した。結果をまとめると以下ようになる。

- ① 界面付着、破断を考慮する仮定条件を加える事で、実際の単繊維引抜き挙動に近いモデルを構築することが出来た。
- ② 繊維の表面損傷による強度の低下、破断を考慮することにより、実際的な多繊維引抜き挙動に近いモデルを構築することが出来た。
- ③ S-N 曲線を考慮することで、架橋応力の劣化、つまり交番荷重状況下による疲労モデルの構築することが出来た。
- ④ 比較を行った結果、誤差が見られるためさらにモデルの拡張を検討する必要がある。

以上の事を踏まえ、今後の課題としては前述したモデルの拡張、ひずみと荷重回数から応力レベルを求めるモデルの作成、繊維だけの交番荷重実験を行い、繊維の S-N 曲線を求めることが必要である。

#### [参考文献]

- 1) Kavalin Wangsiripaisal: Uniaxial Tension-Compression Fatigue Behavior and Deterioration Mechanism of Engineered Cementitious Composites, Master thesis, University of Tokyo, 2006.
- 2) 全邦釘: 架橋応力劣化則のモデル化と ECC の疲労実験による検証、東京大学工学部、学士論文、2003.
- 3) 閑田徹志、Li Victor C、浜田敏裕: ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の材料設計と開発閑田、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、1998.
- 4) B.A.Sanders、editor: Short fiber reinforced composite materials、ASTM、STP 772、1982.
- 5) 川本寛ほか共著: 金属の疲れと設計、コロナ社.
- 6) Zhang J.and Sang H Bridging Behaviour and Crack Growth in Fibre Reinforced Concrete under Fatigue Loading、Brittle Matrix Composites、1997.