論文 引張疲労荷重を受ける ECC の応カーひずみ関係の推定

角間 恒^{*1}·松本 高志^{*2}·林川 俊郎^{*3}·何 興文^{*4}

要旨:従来のセメント系材料と比較して高い引張強度,変形性能を有する ECC は既設構造物の補修・補強材 として適用されることが期待されている。本研究では、繊維の疲労破断による架橋性能の低下を考慮した架 橋応力-開ロ幅関係を有限要素解析に導入することで、引張疲労荷重を受ける ECC の応力-ひずみ関係の推 定を行った。その結果、架橋応力-開ロ幅関係および応力-ひずみ関係からは、疲労荷重下であってもマル チプルクラック特性を示すことがわかった。また、推定した関係は既往の引張疲労試験を再現でき、提案モ デルにより疲労荷重下での ECC の引張構成則を得ることができた。 キーワード: ECC、架橋応力劣化、応力-ひずみ関係

1. はじめに

高靭性セメント複合材料 (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC) はセメント系材料を繊 維で補強した複合材料であり、曲げモーメントあるいは 引張力作用下において,繊維の架橋効果により,ひび割 れ発生後の応力の増加を伴いながらひずみが増大するひ ずみ硬化特性と, 複数のひび割れが分散発生するマルチ プルクラック特性を示す材料である。DFRCC の一種であ る ECC (Engineered Cementitious Composite) は,一軸引 張応力下でひずみ硬化を示し,微細で高密度の複数ひび 割れを形成することにより最大引張ひずみが数%に達す る,高い靭性・変形性能を有する。また,微細なひび割 れ幅により、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。ECC は広範囲に複数ひび割れを形 成することで、局所化ひび割れの進展により破壊するコ ンクリートや繊維補強コンクリートに比べ,疲労強度の 低減が少なく,高い疲労耐久性を有することから, ECC は供用期間中に数百万回の交通荷重を受ける道路橋床版 の増厚材をはじめとした、疲労損傷が問題となる既設構 造物の補修・補強材料としての適用性が非常に高いとさ れる。

ECCの材料設計ではマイクロメカニクスおよび破壊力 学を用いることで実験結果を再現できることが確認され ており、パラメトリックスタディにより材料設計の最適 化を行うことが可能である。一方で、材料および構造物 の疲労設計に関しては、静的耐荷力に基づいて考慮され ることが多く、疲労破壊の機構に基づいた設計手法の提 案が必要となっている。

本研究では,疲労荷重を受ける ECC の引張性能の低下

を、繊維の疲労破断による架橋応力の劣化で表現する架 橋応力劣化モデルから、載荷回数を考慮した応力-ひず み関係を推定し、既往の ECC 引張疲労試験¹⁾の結果と比 較を行うことで、結果の妥当性を検討する。

2. 引張疲労試験¹⁾

2.1 実験概要

使用された材料は, **表**-1の PVA 繊維を用いた PVA-ECC であり, ECC の配合は**表**-2 に示している。供試体 の形状を図-1, 写真-1 に示す。

引張単調試験を3本の供試体について,引張疲労試験 を9本の供試体について実施した。前者は静的引張強度 および疲労試験の変位振幅を決定するためのものであり, 引張疲労試験は変位振幅一定の変位制御(変位振幅 0.1,

長さ (mm)	12
直径 (µm)	37.7
体積混入率(%)	2.1
弾性係数(GPa)	36.7
繊維強度(MPa)	1610
付着強度(MPa)	2.01

表-1 繊維特性

表-2 ECC 配合(重量比)

水	1
セメント	0.32
細骨材	0.42
AE 減水剤	0.03
メチルセルロース	0.00071

*1 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻 (正会員)

- *2 北海道大学大学院准教授 工学研究科環境創生工学専攻 Ph.D. (正会員)
- *3 北海道大学大学院教授 工学研究科環境創生工学専攻 工博 (正会員)

*4 北海道大学大学院助教 工学研究科環境創生工学専攻 博(工)

0.15, 0.2mm),周波数 4Hz で行われた。疲労試験に関し ては,各変位幅値について供試体がそれぞれ3本ずつで あり,うち2本は繰返し載荷回数30万回前後,1本は載 荷回数200万回である。

2.2 実験結果

(1) 引張単調試験

引張単調試験では、ひび割れ発生後に応力の増加と減 少を繰返しながらひずみ硬化する ECC 特有の挙動が示 され、複数のひび割れも観測された。その後1本のひび 割れに損傷が集中・局所化することで、応力の急激な低 下が見られた。局所化時の引張ひずみは0.4%程度であり、 同配合の引張試験と比較して、引張性能は非常に小さい。 しかしながら、この引張単調試験は引張疲労試験の変位 振幅を決定するための試験であったこと、また ECC の特 徴である複数ひび割れの発生とひずみ硬化挙動が確認さ れたことから、この試験により本研究における解析結果 を検討する。

(2) 引張疲労試験

引張疲労試験では、載荷初期には応力が徐々に低下し、 載荷回数が増加するにつれてその低下割合は大きくなっ た。さらに、載荷回数が大きくなり 10 万回~50 万回に 達すると応力の低下は再び鈍く、あるいはほぼ一定にな った。この一連の疲労挙動からは、応力低下が小さい載 荷初期では繊維の破断あるいはマトリクスからの引抜き により徐々に応力が低下し、ある載荷回数で損傷が1本 のひび割れに集中することで応力の急激な低下が見られ、 載荷後期ではPVA繊維においても金属材料が持つような 疲労限に達していたと予想される。

試験終了後の破断面について,引張単調試験により破 壊させた破断面と比較すると,疲労試験の供試体のほう が破断した繊維に対して引抜かれている繊維が少なく, 繊維の疲労による破断繊維の増加が引張応力低下のメカ ニズムであった。

3. 架橋応力劣化モデル

. /

3.1 架橋則

ECC はマイクロメカニクスと呼ばれる材料の微小要素 の挙動を数式化した力学モデルに基づき設計される。そ の最も重要な性能が架橋則と呼ばれる,ひび割れ箇所で の繊維架橋応力(σ_b)とひび割れ開口幅(δ)の関係(架 橋応力–開口幅関係)であり,繊維,マトリクスおよび 両者の界面に関するパラメータにより表される。また, ひずみ硬化挙動が生じるときには,以下が成り立つ²⁾。

$$\sigma_{peak} \ge (\sigma_{fc})_i \tag{1}$$

$$J_b / J_{tip} \ge 1 \tag{2}$$

ここに、 σ_{peak} は架橋応力最大値、 $(\sigma_{fc})_i$ は初期ひび割れ



強度, *J*_{tip} はひび割れ先端のマトリクス破壊靭性, *J*_b は架 橋応力-開口幅関係の全コンプリメンタルエネルギーで ある。式(1)はひび割れ発生後に応力が増加するための条 件であり,式(2)は定常ひび割れ状態(steady state cracking) と呼ばれる ECC 特有のひび割れ進展を示すための条件 である。定常ひび割れ状態とは,一定の荷重下でひび割 れ幅が一定のままひび割れが進展するものであり,ひび 割れ長さが大きくなっても架橋応力が保持されることで, 複数ひび割れの発生を促すことになる。

本研究で用いる架橋則は、短繊維補強複合材料の基礎 的力学モデルである繊維引抜きモデル(Fiber Pullout Model)から、汎用繊維であるポリビニルアルコール

(PVA)繊維を補強用繊維として用いた PVA-ECC の特 徴を考慮して構築した数値モデルであり、マトリクス性 能に関するパラメータについては考慮していない。繊維 引抜きモデルは、

- 繊維-マトリクス界面は摩擦による一定の付着のみ を考慮する
- 2) 繊維は十分に高い強度を有しており破断しない

といった,いくつかの仮定条件の下に成り立っており, 本研究では以下の項目ついてその拡張を行った。

(1) 界面付着強度の変化

繊維ーマトリクス界面の付着は化学付着と摩擦付着の

2 種類に大別できる³⁾。汎用繊維であるポリエチレン繊維 では化学付着が無視できるほど小さいのに対し, PVA 繊 維では大きな化学付着力が特徴である。ここでは繊維-マトリクス界面の化学付着が剥がれて摩擦付着に置き換 わる過程を,繊維の相対変位δを用いて次のように表す。

$$\tau = \tau_s \cdot [1 - \{1 - (\delta/\delta_{0\tau})\}^2] \quad (0 \le \delta \le \delta_{0\tau}) \tag{3}$$

$$\tau = \tau_i + (\tau_s - \tau_i) \cdot Exp[\alpha_\tau \cdot \{1 - (\delta/\delta_{0\tau})\}]$$

(\delta_{0\tau} < \delta)

ここに、 τ は界面付着力、 τ_s は化学付着強度、 τ_i は摩擦 付着強度、 $\delta_{0\tau}$ 、 α_t は係数であり、 $\delta_{0\tau}$ は化学付着の剥離が 開始する時の δ 、 α_t は化学付着が剥離する速度を表す。

(2) 繊維破断

PVA 繊維では、大きな化学付着強度に対し引張強度が 小さいため、繊維の破断を考慮しなければならない⁴⁾。 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 生じるものとし、破断繊維の伝達荷重を0としている。

(3) 繊維強度の低減

マトリクス中の繊維は繊維表面の損傷や曲げにより, その強度が低下する³⁾。この影響は繊維の配向角度 Øの関 数として次のように表される。

$$\sigma_{f\mu} = \sigma_{f\mu}^n \cdot e^{-f'\phi} \tag{5}$$

ここに、 σ_{fu} は見かけの繊維強度、 $\sigma_{fu}^{"}$ は繊維強度、f'は係数である。

(4) 架橋応カー開口幅関係

前項までの拡張事項を繊維引抜きモデルに導入した架 橋則について数値的なモデルを構築し,架橋応力-開口 幅関係を算出した(図-3中の載荷回数1回目)。算出結 果は,開田らにより提案されている架橋則⁵⁾に対して十 分な適合性を示している。開田らの式との違いには,界 面付着力およびマトリクス弾性係数の扱いがある。前者 について,本モデルでは式(3)および(4)におけるパラメー タ δ_{0r} α_r を開田らの式を用いてキャリブレーションした。 後者について, PVA-ECC における繊維弾性係数とマト リクス弾性係数との比あるいは繊維のすべりにより,繊 維の変位に対してマトリクスの変形が十分小さくなるこ とから,その影響を無視できる。

3.2 繊維の S-N 関係

繊維の架橋性能は架橋則により評価され,その劣化は 載荷回数の増加による繊維の架橋応力の低下により説明 できる。ECCの架橋応力劣化は繊維の破断,マトリクス からの引抜けにより生じる。PVA-ECC では繊維破断が 卓越することが文献1により確認されており,本研究の 劣化モデルでは架橋応力の劣化を繊維の疲労破断のみで 表現する。

繊維の S-N 関係は次式で表し、載荷回数の増加に伴

う繊維強度の低下を架橋則に導入した。

$$\sigma_N / \sigma_{max} = 1 - k_f \cdot LogN \tag{6}$$

ここに、N は載荷回数、 σ_N は N 回載荷時の繊維強度、 σ_{max} は初期繊維強度、 k_f は係数である。繊維単体の疲労 試験を実施するのは困難であることから、係数 k_f は鋼材 の S-N 関係を参考に、既往の ECC 引張疲労試験結果を 再現する k_f として、応力比 50%で 10 万回の疲労限から $k_f = 1/10$ とした。

3.3 算出結果

(4)

算出された架橋応力-開口幅関係(図-3)からは,載 荷回数の増加に伴う架橋応力の劣化が確認でき,架橋応 力最大値の低下により ECC の引張性能が大きく低下す ることがわかる。ここで,架橋応力-開口幅関係の算出 に際して除荷-再載荷といった疲労サイクルについては 表現しておらず,一度破断した繊維が次の載荷時には再 度破断するまで応力の伝達に寄与しているため,引抜き 荷重が小さく繊維破断が生じないひび割れ開口幅の小さ い領域では架橋応力の劣化が見られない。図-4 には J^{*}bJ_{tip}と載荷回数の関係を示す。なお,図-4ではすべて の載荷回数において J_{tip}=3.1kJ/m² としており,疲労によ るマトリクス破壊靭性の変化は考慮していない。ひずみ 硬化が生じるための条件に着目すると,疲労荷重を受け る ECC の引張挙動に関して,次のことが予想できる。載 荷回数約 1000 回目までは式(2)の条件を満たしており,





破断繊維の増加により架橋性能が低下しても、ひずみ硬 化挙動を示す。特に載荷回数 10 回目までは、マルチプル クラックが飽和するとされる *J*_b/*J*_{tip}>3 を満たしており、 また架橋応力最大値にも低下が見られないことから、引 張性能も変化しない。載荷回数が増え *J*_b/*J*_{tip}の値が臨界 に近づくことで、マルチプルクラック特性を示しにくく なり、ECC の引張性能が低下、載荷回数 1000 回以降で は式(2)を満たさなくなるため、新たなひび割れが生じる ことなく損傷が 1 本のひび割れに集中することで、一般 的な繊維補強セメント複合材料と同様の緩やかな勾配を 有する軟化挙動を示すこととなる。

4. 応カーひずみ関係の推定

4.1 推定手法

前章で算出した架橋応力ー開口幅関係をインターフェ ース要素により離散ひび割れモデルとして有限要素解析 に導入し, ECC の応力--ひずみ関係を推定する。有限要 素モデルは文献 6 の一軸直接引張試験のひずみ計測区間 を基にした2次元長方形モデル(30x80mm)である。引 張疲労試験の供試体とは寸法が異なるが,実験では断面 が減少する箇所のみにひび割れが発生し、また一軸引張 状態でありひび割れ発生の過程に変化はないため、この モデルにより解析を実施した。軸方向の要素分割は、文 献5の引張試験で観察されたひび割れ間隔を参考に、ひ び割れ間隔が最小で1.5mm程度となるような分割とした。 解析モデル端部に変位を与え,軸力がひび割れ強度に達 した断面に架橋応力ー開口幅関係を構成則とするインタ ーフェース要素を挿入する。ひび割れ長さに関しては, ECC の特徴的なひび割れの進展である定常ひび割れ状態 を考慮して、断面全体にひび割れが発生するものとした。 また、ガンマ分布に従う確率密度関数を用いて、ひび割 れ強度のランダム性を考慮している。

疲労解析では、インターフェース要素の構成則となる

架橋応力-開口幅関係を劣化させており、図-5 に示す ようにそれぞれのひび割れ面が受ける見かけの載荷回数 時の関係を用いている。また、疲労によるひび割れ発生 強度の低減を次式で考慮している。

 $f_N / f_1 = 1 - k_m \cdot LogN \tag{7}$

 f_N , f_1 はそれぞれ載荷回数 N 回目, 1 回目のひび割れ強度であり, f_1 は 3MPa とした。係数 k_m はコンクリートの疲労設計強度式⁷⁾より $k_m=1/17$ とした。

4.2 推定結果

(1) 単調載荷

載荷回数1回目の架橋応力-開口幅関係を用いて引張 単調載荷時の引張応力-ひずみ関係を算出した。図-6 (載荷回数1回目),図-7はそれぞれ応力-ひずみ関係, 引張ひずみ 0.1, 0.15, 0.2%時のひび割れ分布であり, ECC 特有の挙動であるひずみ硬化挙動および複数ひび割れの ランダム発生を表現できている。引張強度時のひずみ(終 局ひずみ)は1.5%程度まで達しており, ECC の高い引張 性能を解析により確認した。解析で用いた初期ひび割れ 強度および繊維特性と同程度の特性を有する PVA-ECC の引張単調試験においても同等の終局ひずみが確認され ており,離散ひび割れモデルとして架橋応力-開口幅関 係を有限要素解析に導入することで, ECC の引張挙動を 評価できる。一方,実験では引張ひずみ0.4%程度で損傷 の局所化が生じており,算出した関係では終局状態を再 現できていない。初期欠陥やひび割れ箇所での繊維混入 量等によるマルチプルクラック特性の低下が考えられる 実験では、同配合の ECC と比較しても引張性能が極端に 小さくなったのに対し、解析ではマトリクス、繊維とも にそれらの性能を理想的に発揮する条件であるため引張 性能に大きな差が生じた。しかしながら,着目するひず み(0.1, 0.15, 0.2%)以前の関係については十分に一致 しており, 文献1の引張疲労試験との比較により, 応力 --ひずみ関係の検討を行うこととした。

(2) 疲労載荷

載荷回数毎の応カーひずみ関係を図-6 に示す。ここで、本研究では軟化挙動の表現には至っておらず、文献 5 で計測された応カーひずみ関係の軟化勾配により仮定 している。また、架橋応力劣化モデルにて載荷回数によ る架橋応力最大値後の架橋応力低下割合に変化が見られ ないことから、すべての載荷回数において軟化勾配を一 定としている。

図-6 からは載荷回数の増加による架橋応力の劣化に 伴う引張応力の減少および終局ひずみの減少が確認でき る。載荷回数1000回までは架橋応力最大値がひび割れ発 生強度を上回るため, ひび割れ発生後にひずみ硬化挙動 を示す。また、図-3にて架橋応力最大値以前に目立っ た架橋応力劣化が見られないことから、ひび割れ強度の 低下分だけ引張応力が減少している。載荷回数1万回以 降では,破断繊維が増加することで架橋応力最大値がひ び割れ強度より小さくなり、引張応力が架橋応力最大値 に達した直後に軟化域に入る。また、図-8 に示す引張 強度と載荷回数の関係からは、ひび割れ強度と架橋応力 最大値に着目することで容易に応力-ひずみ関係を推定 することもできる。以上の結果は、架橋応力劣化モデル から予想したマルチプルクラック特性の変化にもある程 度適合している。架橋応力劣化モデルから推測されるマ ルチプルクラック特性を示す限界は載荷回数 1000 回程 度であったのに対し、応力-ひずみ関係では1万回程度 となったが、前者における推測ではマトリクス破壊靭性 (J_{tin}) に関して疲労の影響を考慮していないこと,後者 はひび割れ強度と架橋応力最大値の関係のみに着目した ものであることを考えると、解析によりマルチプルクラ ック特性の限界を予測するためには、前者では疲労によ る Jin 値の変化を、後者では式(2) による定常ひび割れ状 態となる条件に関して検討を加える必要がある。

解析結果は応力レベルに関して実験値と比較を行った。 応力レベルとは着目ひずみにおける N回目載荷時の引張 応力(σ_N)と1回目載荷時の引張応力(σ_I)との比で表 される値(σ_N/σ_I)である。ここでは引張ひずみ振幅 0.2, 0.15, 0.1%で算出した応力レベルを図-9に示す。載荷回 数 1000回目までは着目ひずみにおいて硬化挙動中にあ り、載荷回数の増加に対して一定の割合で引張応力が減 少するため、応力レベルの低下にも線形性が見られ、そ の低下幅も小さい。硬化挙動を示さない載荷回数 1 万回 以降では、応力レベルの気下にも線形性が見られ、そ の低下幅も小さい。硬化挙動を示さない載荷回数 1 万回 以降では、応力レベルの気下が見られる。ひずみの 値による応力レベルの変化に着目すると、ひずみが大き いほど応力レベルの低下が顕著に現れることが実験およ び解析の両者から確認できる。軟化挙動中にある載荷回 数 1 万回以降においてこのことは自明であるが、硬化挙



図-8 引張強度と載荷回数の関係

動中にある載荷初期から中期に関しては、ひずみの増加, つまり、ひび割れ開口幅が大きくなることで繊維の引抜 き荷重が大きくなり、繊維が破断しやすくなっているか らである。また、図-9ではひずみが大きいほど精度の 良い結果が得られている。これは、ひずみが大きくなり 繊維破断が増加することで、繊維引抜きの影響を繊維破 断で補って表現されるため、ひずみが大きいほど実験値



との差が小さくなっているからである。しかしながら, 繊維破断のみを考慮したモデルであっても実験結果を十 分に再現できており,引張疲労荷重を受ける PVA-ECC の応力-ひずみ関係を得ることができた。

なお、本研究では式(6)において、繊維強度の低下を載 荷回数Nのみで表現したが、実際の複合材料では繊維の 変位量により繊維強度の低下には差が生じる。ここでは、 変位振幅が小さくひび割れ幅に大きな差がないため、変 位振幅の異なる実験を載荷回数Nのみの関数で再現でき たが、より大きな変位を受けるケースに関しては、追加 実験により提案モデルの検討を行う必要があると考えら れる。

5. 結論

本研究では、繊維の疲労破断に着目した架橋応力劣化 モデルから、PVA-ECCの引張疲労荷重下での応力-ひ ずみ関係を推定し、次の結論を得た。

- 架橋則に繊維の S-N 関係を導入することで、繊維の疲労破断を考慮した架橋応力-開ロ幅関係を算出し、疲労荷重下であってもある程度の複数ひび割れが発生することを確認した。
- 2) 有限要素解析により得られた応力-ひずみ関係は引 張疲労試験を良く再現し、疲労解析に必要な載荷回 数を考慮した ECC の引張構成則が得られた。
 - 今後の課題としては、次のことが挙げられる。
- 本研究ではPVA繊維を対象とした架橋応力劣化モデ ルを用いたが、繊維の引抜けを考慮した、繊維の特 性によらない劣化モデルへ拡張する必要がある。
- 本手法で得られる応力-ひずみ関係を用いて、構造 物の疲労耐久性を評価することが考えられる。

参考文献

- Peerapong, S.: Fracture Mechanics Based Fatigue Life Analysis of RC Bridge Slab Repair by Fiber Cementitious Materials, Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 2003.
- Li, V.C.: From Micromechanics to Structural Engineering

 the Design of Cementitous Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.10, No.2, pp. 37-48, 1993.
- Kanda, T., and Li, V. C.: Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.10, No.1, pp.5-13, 1998.
- Maalej, M., Li, V. C., and Hashida, T.: Effect of Fiber Rupture on Tensile Properties of Short Fiber Composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.121, No.8, pp.903-913, 1995.
- 5) 閑田徹志, 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, pp.229-233, 1998.
- 6) 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.
- コンクリート標準示方書・構造性能照査編, 土木学 会, 2002.