

引張疲労荷重下における ECC の応力-ひずみ関係の推定

Estimation of Stress-Strain Relation of ECC under Uniaxial Tension Fatigue Loading

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 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. まえがき

高靱性セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composite、以下、ECC) は引張荷重下での繊維の架橋効果による擬似ひずみ硬化特性および複数の微細ひび割れを形成することで、従来のセメント系材料 と比べ極めて高い靱性・変形性能を有する材料である。また、ひび割れ開口幅の抑制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 ECC 特有の挙動は疲労荷重下においても確認されており、供用期間中に数百万回の自動車荷重を受ける道路橋床版の増厚などに適用されることが考えられている。しかしながら、構造物の疲労設計は静的耐荷力に基づいて考慮されることが多く、疲労破壊の支配的な機構に基づいた材料および構造設計手法の確立が必要となっている。

著者らは、これまでの研究で、疲労に伴う架橋応力の劣化を繊維の疲労破断で表現した、架橋応力劣化モデルの構築を行ってきた¹⁾。本研究は、同モデル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-ひずみ関係を推定し、既往の引張疲労試験²⁾と比較を行うことで、推定結果の妥当性を検討するものである。

2. 架橋応力劣化モデル

2.1 架橋則

ECC の材料設計では、繊維の直径、弾性係数、引張強度、混入率等の微視的材料定数を用いたマイクロメカニクス理論により実験結果を再現できる。その最も重要な性能が架橋則であり、ひび割れ箇所での繊維による架橋応力とひび割れ開口幅の関係 (架橋応力-開口幅関係) で表される。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¹⁾である。

数値モデルにより算出された架橋応力-開口幅関係は、関田らにより提案されている架橋則³⁾に対し、十分な整合性を有しており、同モデルによりひび割れの挙動を評価することが可能である。

2.2 劣化モデル

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および繊維-マトリクス間の摩擦の平滑化により生じる。PVA-ECC では繊維破断が他の要因と比較して卓越する結果が曲げ疲労試験²⁾により報告されていることから、本研究では架橋応力の劣化を繊維の疲労破断の

みで表現した。

繊維の S-N 関係は次式で表し、繰返し载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。

$$\sigma_N / \sigma_{\max} = 1 - k_f \log N \quad (1)$$

ここに、 σ_N は N 回载荷時の繊維強度、 $\sigma_{\max}$ は初期繊維強度、 k_f は係数、N は载荷回数である。係数 k_f は、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 $k_f = 1/10$ としている。

図-1 は算出された架橋応力-開口幅関係であり、繰返し载荷回数の増加による架橋応力の低下が確認できる。

3. 応力-ひずみ関係の推定

3.1 算出手法

架橋応力劣化モデルを有限要素解析に導入することで応力-ひずみ関係を算出する。有限要素モデルは文献 4) の一軸直接引張試験におけるひずみ計測区間を参考にした 2 次元長方形モデル (30x80mm) である。軸方向に変位を与え、軸力がひび割れ発生強度に達した断面にインターフェース要素を挿入することでひび割れを表現する。なお、ECC の特徴的なひび割れの進展に、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定常ひび割れ状態 (steady state cracking) があることから、断面全体にひび割れが発生するものと仮定している。また、ひび割れ発生強度のランダム性をガンマ分布に従う確率密度関数により、繰返し载荷によるひび割れ発生強度の低下を次式により考慮している。

$$f_N / f_1 = 1 - k_m \log N \quad (2)$$

f_N 、 f_1 はそれぞれ载荷回数 N 回目、1 回目におけるひび割れ強度である。係数 k_m はコンクリートの疲労設計式を参考に $k_m = 1/17$ としている。

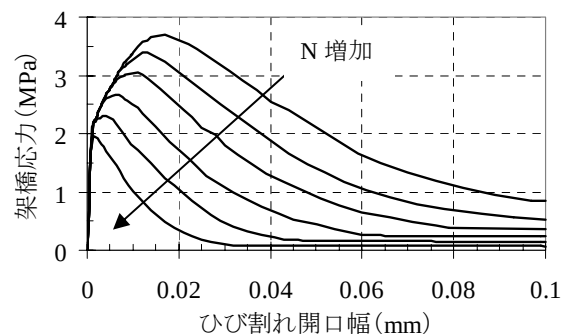


図-1 架橋応力-開口幅関係
($N=1, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$)

3.2 推定結果

繰返し載荷回数毎の応力-ひずみ関係を図-2 に示す。図-2 から架橋応力の劣化に伴う引張応力の減少および損傷局所化の早期化が確認できる。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し、引張応力はセメントひび割れ強度の低下分だけ減少している。載荷回数 1 万回以降では破断する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るため、引張応力が強度に達した後、硬化挙動を示すことなく、一般的繊維補強コンクリートと同様に緩やかな軟化勾配を有する挙動を示すこととなる。

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_1) との比 (σ_N/σ_1) で表される値である。ここでは引張ひずみ 0.2、0.15、0.1% における応力レベルを算出した (図-3)。

載荷回数 1000 回目までは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る。ひずみ制御値以前で損傷の局所化が生じる載荷回数 1000 回～1 万回目以降では硬化挙動を有さないことで、急激な応力低下が見られ、応力レベルも大きく低下する。応力レベルの低下はひずみが大きいほど顕著に現れているが、これはひずみの増加、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-3 からひずみが小さくなるほど、実験値に対して解析値が大きくなる傾向が見られる。本研究では、架橋応力の劣化を繊維の疲労破断のみで表現しているが、ひずみが大きくなるほど繊維破断の可能性が高まることで、破断以外の影響による架橋応力の劣化を繊維破断で補って表現されることとなったために、ひずみが大きくなるほど実験値との差は小さくなったと考えられる。しかし、繊維の破断のみを考慮したモデルであっても実験を十分に再現できる結果が得られており、本研究の推定方法を用いることで、架橋応力劣化モデルから、引張疲労荷重を受ける ECC の引張応力-ひずみ関係を推定できると言える。

4. あとがき

本研究では、ECC の疲労劣化を繊維の疲労破断で表現した架橋応力劣化モデルを有限要素解析に導入することで、引張応力-ひずみ関係の推定を行い、引張疲労試験結果を再現できることが確認された。今後の課題としては、得られた応力-ひずみ関係を用いて、構造物の疲労耐久性の評価を行うことが挙げられる。

参考文献

- 1) 松本高志、角間恒、林川俊郎：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、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.64、2008。

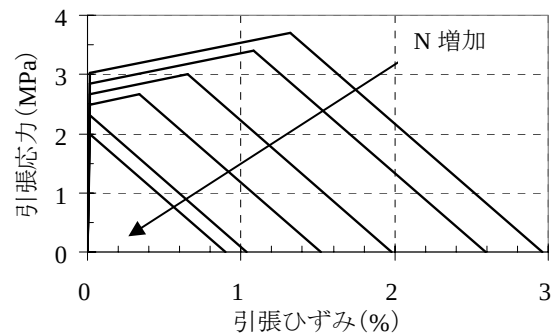


図-2 引張応力-ひずみ関係
($N=1, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$)

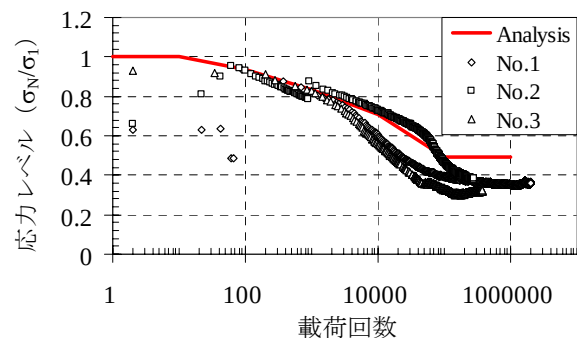
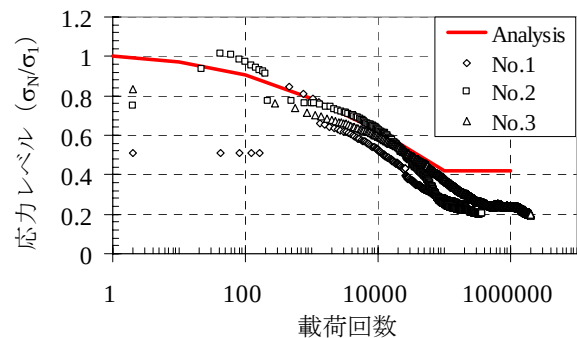
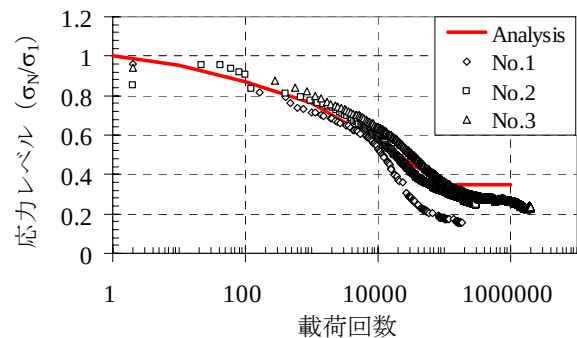


図-3 応力レベル (上から、0.2%、0.15%、0.1%)

- 2) Peerapong, S. : Fracture Mechanics based Fatigue Life Analysis of RC Bridge Slab Repair by Fiber Cementitious Material, Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 2003.
- 3) 関田徹志、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.229-234、1998.
- 4) 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.