

ECC の疲労劣化モデルと曲げ疲労特性の解析的評価

Modeling of fatigue degradation of ECC and analytical evaluation of fatigue properties of ECC beam under flexure

北海道大学大学院 ○学生員 角間 恒 (Ko Kakuma)

北海道大学大学院 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

北海道大学大学院 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

北海道大学大学院 正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

一軸引張応力下で複数ひび割れの発生に伴いひずみ硬化挙動を示す高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) は、その優れた靱性、変形性、ひび割れ抵抗性から、断面修復材や鋼材との合成部材などへ適用が図られている¹⁾。一方で、疲労部材としての使用が検討されているにも関わらず、疲労特性に関する研究例は少なく、疲労損傷評価手法の開発が必要となっている。

著者らはこれまでに、ECC の配合設計原理であるマイクロメカニクスに基づき材料疲労劣化モデルを構築してきた²⁾が、劣化度を決めるパラメータの少なさから載荷履歴の影響を考慮できないものであった。そこで本研究では、載荷履歴を評価するパラメータとしてひび割れの開閉量を加えた応力劣化式を新たに提案し、ECC 梁の曲げ疲労解析を実施した。疲労解析では、たわみ変化および S-N 線図について曲げ疲労試験結果³⁾と比較したほか、パラメトリック解析により荷重条件が ECC の曲げ疲労特性に及ぼす影響を評価した。

2. ECC の疲労劣化モデル

2.1 概要

ECC の疲労モデルは、架橋則に基づき構築する。架橋則とは、材料を構成する繊維、母材および両者の界面に関する微視的材料定数から導かれる繊維伝達応力とひび割れ幅との関係であり、ECC の配合設計の根幹となるものである。ここでは、疲労下での微視的材料定数の変化を考慮することで、ECC の疲労劣化機構である繊維伝達応力の劣化をモデル化する。

2.2 繊維の疲労強度式と応力劣化関数

ECC の繊維伝達応力の劣化要因には、繊維の疲労破断、引抜けおよび座屈が挙げられるが、本研究では架橋性能の低下を繊維の疲労破断のみに帰す。これは、PVA 繊維使用時には繊維引抜けの影響が小さいこと、架橋則による座屈のモデル化が困難であることによる。具体的には、次式で定義する繊維の疲労強度式により載荷回数の増加に伴う破断繊維の増加を表す。

$$\frac{\sigma_{fu}^n}{\sigma_{fu}^0} = A + \frac{1-A}{\{1+0.2\Delta\delta(N-1)\}^{0.4}} \quad (1)$$

ここに、 $A = -0.51(\Delta\delta/\delta_{\max}) + 0.51$ 、 σ_{fu}^n = 繊維の引張疲労強度、 σ_{fu}^0 = 繊維の引張強度、 $\Delta\delta$ = ひび割れ幅変化、 $\delta_{\max}$ = 最大ひび割れ幅、 N = 載荷回数である。式(1)は PVA-ECC の引張および交番疲労試験結果^{4), 5)}を再現するように決

定している。また、次章以降の疲労解析では、ECC の応力比 $\tilde{\sigma}$ を式(2)により定義し、応力低下量を算出する。

$$\tilde{\sigma} = a + \frac{1-a}{\{1+b\cdot\Delta\delta\cdot(N-1)\}^c} \quad (2)$$

ここに、

$$a = \begin{cases} 0 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} > 1) \\ a_0 - a_0 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) \left(2 - \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \leq 1) \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} -0.004 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} - 1 \right) + 0.005 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} > 1) \\ 0.005 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \leq 1) \end{cases}$$

$$c = 0.71 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right)^3 - 0.71 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right)^2 + 0.35 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) + 0.37$$

$$a_0 = 1 - (0.29 \text{Log}_e \delta_{\max} + 1.45) \quad \Delta\delta_0 = 0.37 \delta_{\max} + 0.01$$

である。上式は、形式を式(1)と同様とし、 $\delta_{\max}$ および $\Delta\delta$ を変数としたパラメトリック解析から係数を決定した。係数 a は応力比の下限値を表し、係数 $\Delta\delta_0$ はその下限値が 0 となる最小のひび割れ幅変化を表す。

3. 曲げ疲労解析

3.1 概要

提案する疲労モデルを用いて ECC 梁の曲げ疲労解析を行った。解析対象は寸法 100×100×400mm を有する直方体の 3 等分点曲げ載荷であり、静的強度に対する最大・最小曲げ応力比 ($S_{\max}$ 、 $S_{\min}$) の間で繰返し載荷を行った。表-1 に解析ケースをまとめる。Case1 は実験³⁾と同様の荷重条件であり、結果の比較を行う。Case2 では $S_{\min}$ が曲げ疲労特性に及ぼす影響を評価する。

3.2 構成則

ECC の応力-ひずみ関係を図-1 に示す。ひび割れが生じた要素では、式(2)に応じて包絡線の応力低下を考慮する。式(2)中の $\Delta\delta$ は、除荷および再載荷開始時のひび割れ直交方向応力 (図中 σ_A 、 σ_B) と架橋則から求めており、ひび割れ直交方向応力と繊維伝達応力が等しくなるようなひび割れ幅 (図中 δ_A 、 δ_B) を取得し、その差として定義する。圧縮側は弾性であり、疲労の影響は考慮しない。

4. 疲労解析結果

4.1 静的解析

単調載荷解析により得られる曲げ強度は 9.0N/mm² で

表-1 解析ケース

Case	$S_{\max}$	$S_{\min}$
1*	0.9, 0.85 0.75, 0.6 0.5	$0.2S_{\max}$
2	0.9, 0.8, 0.7 0.6, 0.5	0.0, 0.1, 0.2

*Case1 は実験³⁾と同様の荷重条件

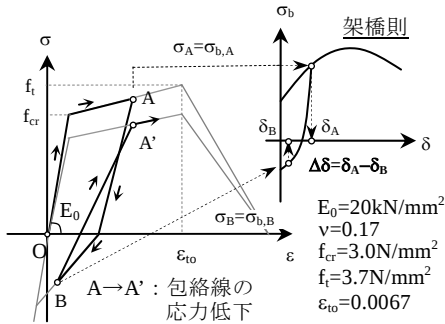


図-1 ECCの応力-ひずみ関係

あり、静的試験³⁾の範囲内 ($8.2-9.6\text{N/mm}^2$) であることを確認した。なお、 $S_{\max}$ および $S_{\min}$ は、実験結果の平均値 8.7N/mm^2 を基準としている。

4.2 Case1 の結果

図-2 に、 $S_{\max}=0.9$ および 0.75 としたときの中央たわみの変化を示す。両ケースとも、破壊時の荷重回数 N_f に対し、 $N=0.25N_f$ 程度からたわみの漸増が始まり、 $N=0.5N_f$ 程度 (図中の矢印) で引張下縁が引張強度に達した後に疲労破壊に至る。解析結果は、破壊時のたわみを過小に見積もるものの、実験においてたわみの急増が開始する点までよく再現できている。

図-3 には、S-N 線図を示す。解析により得られる S-N 線図は実験結果の下限を表しており、本研究で提案する ECC の疲労劣化モデルにより、梁部材の曲げ疲労寿命を予測できるものと考えられる。

4.3 Case2 の結果

図-4 に $S_{\min}$ ごとの S-N 線図をまとめる。図より、 $S_{\min}$ が大きくなる、すなわち、荷重振幅が小さくなるにつれて破壊までの荷重回数が増加し、 $S_{\max}$ が小さいほどその傾向が顕著となることわかる。図-5 は、 $\log_{10}N_f$ と $(1-S_{\max})/(1-S_{\min})$ の関係であり、解析結果は次式により直線近似でき、実験結果が回帰線上にプロットされる。

$$\log_{10}N_f = k_1 \frac{1-S_{\max}}{1-S_{\min}} + k_2 = 4.481 \frac{1-S_{\max}}{1-S_{\min}} + 3.305 \quad (3)$$

ここに、 k_1 、 k_2 は係数である。コンクリートの圧縮疲労試験では、圧縮強度に対する最大および最小圧縮応力比を用いて、 $k_1=17$ 、 $k_2=0$ とすることで実験結果が再現される⁶⁾が、ECC 梁の曲げ疲労荷重においても同形式の疲労強度式を定義できることを示唆する結果となった。

5. おわりに

本研究では、荷重履歴を考慮し得る ECC の疲労劣化モ

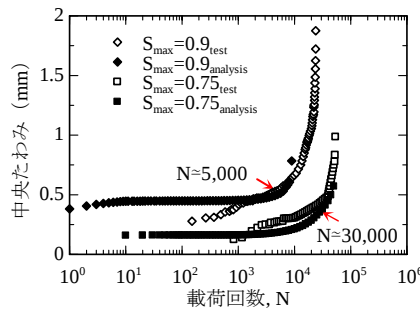


図-2 たわみ変化 (Case1)

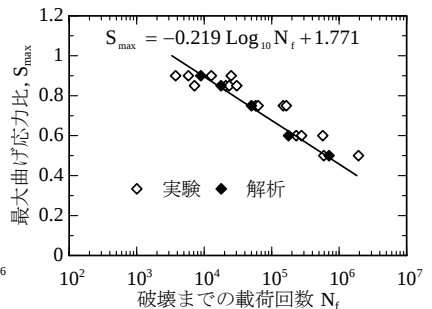


図-3 S-N 線図 (Case1)

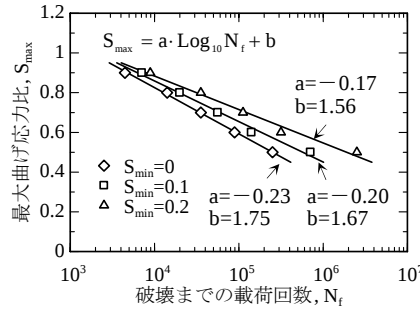


図-4 S-N 線図 (Case2)

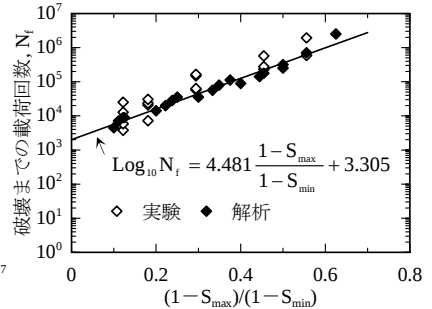


図-5 疲労強度式

デルを構築し、梁部材の曲げ疲労解析を行った。その結果、提案するモデルにより曲げ疲労試験結果を再現できること、最大および最小曲げ応力比による影響を評価し、既往の形式の式により破壊までの荷重回数が推定されることを示した。

謝辞

本研究は、科研費・基盤研究(C) (課題番号 21560498) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：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)、2007。
- 2) 角間ら：引張疲労荷重を受ける ECC の応力-ひずみ関係の推定、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.2、pp.277-282、2009。
- 3) Suthiwarapirak, P. et al.; Multiple Cracking and Fiber Bridging Characteristics of Engineered Cementitious Composites under Fatigue Flexure, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.16, No.5, pp.433-443, 2004。
- 4) Matsumoto, T. et al.: Effect of Fiber Fatigue Rupture on Bridging Stress Degradation in Fiber Reinforced Cementitious Composite, Proceedings of FraMCoS-5, pp.653-660, 2004。
- 5) Matsumoto, T. et al.: Uniaxial Tension-Compression Fatigue Behavior and Fiber Bridging Degradation of Strain Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites, International Journal of Fatigue, Vol.32, No.11, pp.1812-1822, 2010。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書・構造性能照査編、2002。