# 論文 ECC の疲労解析モデルの構築

松本 高志<sup>\*1</sup>・SUTHIWARAPIRAK, Peerapong<sup>\*2</sup>・浅本 晋吾<sup>\*3</sup>

要旨: 歪み硬化型高靭性セメント複合材料(ECC)の疲労解析モデルを構築した。ECCの複数ひび割れによる損傷領域の広がりとひび割れ局所化・進展を考慮している。ひび割れにおける伝達応力の疲労劣化が繊維疲労破断に起因するとし,伝達応力劣化関数の形で含めることにより疲労解析を行っている。ECCの曲げ疲労実験によるS-N曲線を解析モデルによる計算値と比較することにより妥当性を検証した。

キーワード: ECC,架橋応力劣化,繊維疲労破断,疲労寿命解析,S-N曲線

1. はじめに

ECC (Engineered Cementitious Composite)を 特徴付ける引張応力下における複数ひび割れ形 成と歪み硬化挙動は繰返し疲労応力下において も確認されており,ECCを疲労荷重下構造物に 適用した場合に高い疲労耐久性を示すことが期 待されている。

ECC の特性はひび割れにおける繊維架橋特 性に支配されており,疲労耐久性についても同 様に考えることができる。個々のひび割れにお いては,ひび割れ面においてランダムに配置さ れた短繊維が架橋応力を発現し,ひび割れの進 展・開口を抑制する。こうしたひび割れが微細 に複数形成された場合には高いエネルギー吸収 能が期待でき,さらには複数ひび割れがひび割 れの局所化を抑制することにより疲労寿命の向 上につながると考えられる。

上記の ECC の疲労耐久特性を活用した適用 構造物として,重交通荷重を繰返し受ける RC 道路橋の床版やジョイント部などが考えられて いる。疲労特性を把握するには長期の試験が必 要となる事もあり,材料レベルの設計と開発か ら構造レベルでの予測と設計まで,ECC の疲労 挙動に関する解析モデルを構築し,実験的研究 との相互補完を行うことが必要である。 本研究の目的は,ECC の疲労挙動と疲労寿命 を再現し得る疲労解析モデルを構築することで ある。ECC は疲労荷重下においても複数ひび割 れ状態から局所化ひび割れ状態へ遷移すること により最終的な破壊に至る。解析モデルにおい ては,ECC の複数ひび割れと局所化ひび割れの 双方において伝達応力の疲労劣化を考慮する。 伝達応力劣化に関しては,繊維架橋応力の劣化 機構についての考察を基にし,単純な挙動を仮 定した。有限要素法を用いて構築された疲労解 析モデルによる計算値を,曲げ疲労実験により 得られた ECC の繰返し荷重 - 疲労寿命曲線(S - N 曲線)に対して比較・検討を行うことによ り,モデルの妥当性の検証を行った。

### ECC の疲労解析モデル概要

本研究の ECC 疲労解析モデルは有限要素法 を用いており,疲労荷重下における ECC の伝達 応力劣化を考慮している<sup>1)</sup>。ECC は引張応力下 において複数ひび割れを形成し応力が漸増する 硬化挙動を示した後に,ひび割れの局所化と応 力が減少する軟化挙動を示す。複数ひび割れ/ 局所化ひび割れのいずれにおいても,ひび割れ においては繊維が架橋することにより応力が伝 達されている。ここでは疲労による繊維架橋応

<sup>\*1</sup> 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 Ph.D. (正会員)

<sup>\*2</sup> 東京大学 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)

<sup>\*3</sup> 東京大学 工学系研究科社会基盤工学専攻

カの劣化により,初載荷時のつり合いが失われ, ひび割れが進展していくことが ECC の疲労破 壊の支配機構であるとし,複数ひび割れ状態と 局所化ひび割れ状態のそれぞれにおいてこれを 考慮した。以下に詳細を説明する。

複数ひび割れ状態の ECC については弾塑性 連続体としてモデル化した。ECC は引張応力下 でひび割れが局所化する以前の硬化挙動におい ては、分布した複数のひび割れが発生する。こ の複数ひび割れ状態においてひび割れの密度は 高く、個々のひび割れ開口量は小さい。よって、 複数ひび割れ状態にある材料は、ひび割れの開 口量と密度に反映した付加的なひずみ(クラッ クひずみ)を有する連続体としてモデル化し, その構成式は弾塑性理論を適用して導いている <sup>2)</sup>。降伏関数とひずみ硬化則は,ひび割れが最 大引張応力に直交する方向に発生すること、複 数ひび割れにより生ずるひずみが異方的である ことを表せるように定めている。このように連 続体としてモデル化した硬化挙動時の応力を図 - 1 に示すように載荷回数の増加ともに劣化さ せた。各有限要素において,硬化挙動に達した 要素は疲労するものとし,弾性挙動時にある要 素は疲労しないとした。疲労の劣化量について は,繊維架橋応力の疲労劣化を考慮した関数と して,以下の伝達応力劣化関数を解析モデルの 構成式に含めることで表現した。

$$\sigma_{\rm N} / \sigma_{\rm I} = f(\varepsilon, N) \tag{1}$$

ここに, σ<sub>N</sub>: 載荷回数 N のときの伝達応力, σ<sub>1</sub>: 初載荷時の伝達応力, ε: 歪み, である。

局所化ひび割れ状態の ECC については離散 ひび割れとしてモデル化した。一本の局所化ひ び割れの疲労劣化が軟化時の挙動を支配するも のとして,この局所ひび割れ以外の要素につい ては軟化挙動時において除荷状態にあるものと した。局所化ひび割れの劣化挙動に関しては, 既往の研究<sup>3)</sup>を参考に不連続面を表す厚さ0の 要素,インターフェイス要素を梁中心部に用い た。劣化については図-1に示すように,複数 ひび割れ状態時と同様に載荷回数の増加ととも に劣化させ,伝達応力の劣化量は硬化挙動の劣 化に適合させた。ただし,歪みではなく開口変 位δの関数として伝達応力劣化関数を以下のよ うに表現している。

$$\sigma_{\rm N} / \sigma_{\rm 1} = f(\delta, N) \tag{2}$$



図 - 1 複数ひび割れ状態時劣化と 局所化ひび割れ状態時劣化

3. 繊維架橋応力の劣化機構

3.1 界面付着劣化と繊維疲労破断

架橋応力劣化は,疲労ひび割れ挙動,ひいて は疲労寿命に支配的な役割を果たすことが既往 の研究により明らかにされている<sup>4)</sup>。本研究で は繊維架橋応力の劣化機構を考慮することによ り,伝達応力劣化関数(式(1)と(2))を定め た。

繰返し荷重下の繊維架橋応力の劣化は,界面 付着劣化と繊維疲労破断の二種類の機構に起因 する。

界面付着劣化とは,繊維と基質材料の間の界 面における摩擦付着強度が繰返し荷重下におい て減少する現象である。界面付着劣化は実験的 研究<sup>5)</sup>によって確認されている。この実験にお いて,繰返し荷重下での架橋応力が比較的早期 に(<100 cycles)初期強度の 80-90 %まで減少 し,その後長期にわたって徐々に減少し続け, 最小で 50 %(10,000 cycles)にまで減少するこ とが観察されている。この減少は界面付着劣化 によることが,破壊面において繊維の破断は観 察されていないことよりも確認される。

もう一方の機構である繊維疲労破断とはひび 割れ間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,顕著になる。

本研究の比較実験において用いた ECC にお いては,架橋応力劣化が繊維疲労破断に起因し ていることが破壊断面における露出繊維の損傷 状態から推測されており<sup>6)</sup>,繊維疲労破断に基 づいた架橋応力劣化を導入する必要がある。

3.2 繊維疲労破断を考慮した架橋応力則

本研究では,繊維疲労破断を考慮した架橋応 力則を用いた本節の考察により,ECC 疲労解析 にて定めた伝達応力劣化関数の妥当性を示すも のとする。

繊維疲労破断を考慮した架橋応力則では,単 調載荷時に全ての繊維が破断することなく引抜 かれるものとし,単繊維について図-2に示さ れるS-N関係を仮定した。

$$\frac{\Delta \sigma_{\rm sf}}{\sigma_{\rm fu}} = n_{\rm f}^{\rm b} = \frac{1}{n_{\rm f}^{\rm c}} \tag{3}$$

ここに $\Delta \sigma_{sf}$ :繊維応力振幅,  $\sigma_{fu}$ :繊維強度,  $n_{f}$ : 繊維疲労寿命時載荷回数, b:係数 < 0, c = -b である。個々の単繊維が伝達する力を複合材料 中繊維のランダム配向を考慮して積分すること により,ひび割れ面での架橋応力が求められる。 繊維疲労破断の影響は式(3)の条件に達した繊 維を積分において除外することにより考慮する ことができる。最終的に得られる架橋則は最大 架橋応力発現時(ピーク)前後で異なる式とな り,以下の形で表される。



図 - 2 仮定した単繊維の S - N 関係

$$\begin{split} \widetilde{\sigma}_{f}\Big|_{\text{prepeak}} &= \\ g_{1}(\phi_{1})2\sqrt{\alpha}(1-\alpha) \\ &+ g_{1}(\phi_{1})((\alpha\widetilde{\delta}^{*})^{2} - 2\alpha\widetilde{\delta}^{*}\sqrt{\alpha} + \alpha) \\ &+ g_{2}(f,\phi_{1},\phi_{2}) \\ &\left(\left(1-\alpha\widetilde{\delta}^{*}\right) - \left(1-\alpha_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) - \frac{1}{2}\alpha_{f}\beta_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right)^{2} \\ &+ g_{2}(0,\phi_{1},\phi_{2}) \\ &2\left(\left(1-\alpha\widetilde{\delta}^{*}\right) - \left(1-\alpha_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) - \frac{1}{2}\alpha_{f}\beta_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) \\ &\frac{1}{n^{*}} + g_{2}(-f,\phi_{1},\phi_{2})\left(\frac{1}{n^{*}}\right)^{2} \qquad (4) \\ \widetilde{\sigma}_{f}\Big|_{\text{postpeak}} &= \\ g_{1}(\phi_{1})(1-\alpha\widetilde{\delta}^{*})^{2} \\ &+ g_{2}(f,\phi_{1},\phi_{2}) \\ &\left(\left(1-\alpha\widetilde{\delta}^{*}\right) - \left(1-\alpha_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) - \frac{1}{2}\alpha_{f}\beta_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right)^{2} \\ &+ g_{2}(0,\phi_{1},\phi_{2}) \\ &2\left(\left(1-\alpha\widetilde{\delta}^{*}\right) - \left(1-\alpha_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) - \frac{1}{2}\alpha_{f}\beta_{f}\widetilde{\delta}^{*}\right) \\ &\frac{1}{n^{*}} + g_{2}(-f,\phi_{1},\phi_{2})\left(\frac{1}{n^{*}}\right)^{2} \qquad (5) \end{split}$$

依存関係を示すと

$$\widetilde{\sigma}_{f} = f(\alpha, \alpha_{f}, \beta_{f}, \widetilde{\delta}^{*}, n^{*})$$
(6)

の形となる。ここに,  $\tilde{\sigma}_{f} = \sigma_{f}/\sigma_{0}$ :正規化架橋 応力, $\sigma_{f}$ :架橋応力, $\sigma_{0}$ :最大架橋応力, $\alpha = \delta/\delta^{*}$ ,  $\delta$ :開口変位, $\delta^{*} = (\tau L_{f}^{2})/(E_{f}d_{f})$ :複合材料の繊維, 界面に依存するシステムパラメータ, $\tau$ :界面付 着強度,  $L_{f}$ :繊維長,  $E_{f}$ :繊維弾性定数,  $d_{f}$ :繊 維径,  $\tilde{\delta}^{*} = \delta^{*}/(L_{f}/2)$ ,  $\alpha_{f} = \delta_{max}/\delta^{*}$ ,  $\delta_{max}$ :疲労繰 返し載荷時最大開口変位,  $\beta_{f} = \Delta\delta/\delta_{max}$ ,  $\Delta\delta$ :疲 労繰返し載荷時開口幅変化, である。また,  $g_{1}$ と $g_{2}$ は繊維の配向角度のランダム性を考慮する 関数である。最後に n<sup>\*</sup>は正規化載荷回数であり, 以下の式により表される。

$$n^* = \frac{n^c L_f}{L_c} \tag{7}$$

ここに,n:載荷回数,

$$L_{c} = \frac{\sigma_{fu} d_{f}}{4\tau}$$
(8)

である。

得られた架橋則を用いて行った架橋応力劣化 の計算結果が図 - 3 に示されている。ここでは、 複合材料のシステムパラメータを $\delta^*/(L_f/2) = 0.0028$ (ポリエチレン繊維:  $\tau = 0.5$ MPa,  $L_f = 12.7$ mm,  $E_f = 120$ GPa,  $d_f = 38\mu$ m)としている。 また,繰返し載荷条件をひび割れ開口変位によ り与え,最大開口変位を $\alpha_f = 0.1$ ,開口幅変位を $\beta_f = 0.5$ とした。

架橋応力劣化はある限界の正規化載荷回数に 至るまでは生じない。これは,ある繊維が疲労 破断に達するまでは架橋応力の減少が起こらな いが,その後は継続的に疲労破断する繊維の数 が増えてゆくことにより架橋応力が減少してい く為である。

## 3.3 考察

界面付着劣化については既往の研究<sup>5)7)</sup>より, 繊維疲労破断については上記のモデルに基づき, これら二つの劣化挙動について図-4の様に模 式的に表わすことができる。両機構とも二直線 形状に単純化できるが,前者では架橋応力が早 期に減少しその後漸減し,後者では限界点を越 えると劣化が顕在化し継続的に減少していく, という点が異なる。実際には,繊維疲労破断が 支配的な場合においても,二つの支配機構が同 時に作用するものと思われ,架橋応力劣化挙動 は中間的なものになると思われる。

しかしながら,この二つの劣化機構が同時に 作用する場合のモデル化はいまだ成されておら ず,また,本研究で用いた ECC は繊維の破断と 引抜きが同時に発生する種類の複合材料である こともあり,本研究の疲労解析モデルに用いら 伝達応力劣化関数は図 - 4 に表されている中間 的な挙動を考慮していくことにした。

## 4. 疲労寿命解析結果

疲労解析モデルの妥当性を実験と比較するこ とによって検証した。比較実験においては PVA 繊維により補強した ECC を用い,吹付け工法に より作成された<sup>6</sup>。供試体寸法は幅 100 mm 高さ 100 mm 長さ 400 mm の直方体である。最小対最 大荷重比は 20 % (R = 0.2)とし, 8 Hz の 4 点 曲げ疲労荷重を破壊に至るまで加えた。

図 - 5は ECC の一軸引張実験により計測さ れた応力 - 歪み関係であり,4 供試体の平均を 解析モデルの入力とした。図 - 6は単調曲げ載 荷実験による荷重 - 中央変位関係であり,解析 による計算結果は初期の非線形挙動と平均耐





図 - 5 一軸引張下の応力 - 歪み関係

荷力を再現しているが,中央変位で示されるた わみ変形能に関して過小となる結果となってい る。

図 - 7 は総数 22 体の供試体の疲労寿命をま とめた繰返し応力 - 疲労寿命曲線(S - N 曲線) である。各点が実験結果を示し,実線が本研究 の疲労解析モデルによる解析結果を示している。 実験結果は,ECC の特徴的な疲労寿命特性を表 している。疲労寿命は,静的強度と比較して高 い疲労応力であるS = 0.9 の条件下においてN<sub>u</sub> =  $10^4$ (cycles)を示し,S = 0.5 で N<sub>u</sub> =  $10^6$ (cycles) に達する。S - N 曲線は N<sub>u</sub> =  $10^4$ (cycles)を境 として二直線で特徴付けることができ,この ECC のS - N 挙動は金属材料が示すそれに似



図-6 荷重と中央変位の関係



図 - 7 ECC の繰返し応力 - 疲労寿命曲線 各点は実験結果 実線は解析結果

たものとなっている。一方で,繊維補強コンク リートやコンクリートなどのセメント系材料が 示す S-N 挙動は,概ね直線で特徴付けること ができ,両者の間には定性的な相違が見られる。

ECC の特徴的な S - N 挙動は伝達応力劣化挙動と複数ひび割れ挙動の双方が影響しているものと考えられるが,いずれが支配的であるかは今後の研究課題である。

解析結果は疲労解析モデルを用いた疲労寿命 の計算結果である。繊維架橋応力の劣化機構を 考慮して,伝達応力劣化関数を以下のように定 めた。

$$\frac{\sigma_{\rm N}}{\sigma_{\rm 1}} = 1 - (0.045 + 0.55\varepsilon) \log N$$

$$1 < N \le 10^{4}$$
(9)  
$$\frac{\sigma_{N}}{\sigma_{1}} = 1 - (0.045 + 0.55\epsilon) 4$$
$$- (0.240 + 0.55\epsilon) (\log N - 4)$$
$$10^{4} < N$$
(10)

解析結果は実験結果を良好に再現しており,伝 達応力劣化関数に関する推定が妥当なものであ ることを示している。なお,この伝達応力劣化 関数は,本研究で用いた ECC に特有なものであ り,今後は上述した界面付着劣化と繊維疲労破 断の二つの機構を同時に任意の繊維・母材の組 合せについて考慮することが今後の課題である。 また,曲げ以外の載荷状態についても検証を行 う必要がある。

4. まとめ

ECC の特徴である複数ひび割れから局所化 ひび割れへの遷移挙動に関して,複数ひび割れ 状態と局所化ひび割れ状態をそれぞれクラック ひずみを有する連続体と不連続面としてモデル 化した。

伝達応力劣化関数を導入し,繊維疲労破断を 考慮した架橋応力則を導いた。繊維疲労破断に よる架橋応力劣化の特徴は,疲労破断が始まる 載荷回数までは減少がない点にある。界面付着 劣化が比較的早期に減少を生じる点と大きく異 なる。

疲労解析モデルを用いて計算で得られた S-N曲線は,実験結果を良好に再現しており,モデルと伝達応力劣化関数に関する推定が妥当であることを示している。今回観察された特有なS-N曲線を示す機構については今後の課題である。

### 謝辞

本研究を行うに当たり, 鹿島建設技術研究所 閑田徹志氏と日本道路公団菅野匡氏に御協力を 頂いたことをここに深く感謝します。 参考文献

- 浅本晋吾,松本高志:歪み硬化型セメント 系複合材料の疲労実験と解析手法の構築, 年次学術講演会講演概要集,土木学会, V-578,pp.1156-1157,2001
- Kabele, P. and Horii, H.: Analytical Model for Fracture Behaviors of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No. 532/V-30, pp. 209-219, 1996
- Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., and Horii, H.: Fatigue Life Analysis of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Japan Concrete Institute, Vol. 23, No. 3, pp. 127-132, 2001
- Matsumoto, T., and Li, V. C.: Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete with a Fracture Mechanics Based Model, Journal of Cement and Concrete Composites, Vol. 21, No. 4, pp. 249-261, 1999
- Zhang, J. and Stang, H.: Bridging Behaviour and Crack Growth in Fibre Reinforced Concrete under Fatigue Loading, Brittle Matrix Composites 5, pp. 143-153, 1997
- 6) Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., and Kanda, T.: Flexural Fatigue Failure Characteristics of an Engineered Cementitious Composite and Polymer Cement Mortars, Submitted to Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, 2002
- 7) 松本高志, Victor C. Li:破壊力学的手法に 基づく短繊維補強材料の疲労寿命モデル, コンクリート工学年次論文報告集,日本コ ンクリート工学協会, Vol. 20, No. 3, pp. 163-168, 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