水の影響下における ECC のマルチプルクラック発生条件の検討

Study on the multiple crack condition of an ECC under the influence of water

北海道大学大学院工学研究科 正 員 松本 高志 (Takashi Matsumoto) 北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 山﨑 洋紀 (Hiroki Yamazaki) 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1. まえがき

繊維補強コンクリート (FRC) は靭性に富み、繊維と 母材の性質をもとに性能を設計できる特長を持つ。本研 究で扱う高靭性繊維補強セメント複合材料(以下、ECC) は、その FRC の設計自由度を生かし、靭性を向上させ て開発された。この ECC は引張応力下において、ひび 割れが載荷軸に直角に発生する多数の微細クラック(マ ルチプルクラック)が分散する特性を持つ。それにより、 高い歪み効果が得られるため、ECC は靭性にすぐれ、 コンクリートの欠点である破壊時の脆性を改善するこ とができる。

しかし ECC は、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 ているにも関わらず、比較的新しい材料ゆえに疲労荷重 下において、特に水の影響下における研究が十分に進ん でいない。材料と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いが、ECC の疲労破壊に関す る材料設計と構造設計が必要とされている¹⁾。

本研究では、水の影響下での ECC の疲労を検討する 前段階として、水の影響下での引張応力作用時の ECC のモデルを構築する。そして、そのモデルを用いてマル チプルクラックの発生条件を確認し、比較検討を行うこ とを目的とする。

2. 短繊維引抜きモデル

2.1 概要

ECC を設計する際には、繊維-母材間での引抜きに対 する挙動を考えることが重要である。マルチプルクラッ クの生成条件を検討するために、この章では、繊維-母材 間の引抜き挙動について、短繊維引抜きモデルの概要を 示す。

2.2 モデルに対する仮定

引張応力が作用している時の架橋応力-開口幅関係を 求めることを目的として、以下の仮定に基づいて短繊維 引抜きモデルを構築する。

- ・ ひび割れは引張方向に直角な平面として生じる
- ・ 短繊維は母材中の3次元空間にランダムに分散す る

- 繊維-母材間界面剥離は、ひび割れ側から生じ、埋め込み側の繊維端部へと進展する
- 母材変形は繊維の引抜けに比べて微小であり無視できる
- ・ 繊維は母材中に三次元にランダムに分布する
- 繊維のポアソン比は0
- 繊維の破断は軸方向応力が破断強度に達したとき に生じる

以上の仮定に基づき、マルチプルクラックがどの程度 発生するかを考えるため、単繊維の引抜き荷重-開口幅関 係を導出し、その結果を用いてひび割れ架橋応力-開口幅 関係を求める²⁾。

2.3 単繊維の引抜き荷重-開口幅関係

ECC に引張応力が作用し、それが増加すると母材と繊維の引張歪みが比例的に増加する。母材が引張強度に達するとひび割れが生じる。その後の繊維引抜き挙動は繊維-母材間の剥離過程と引抜き過程の2過程に分かれる。 まずは単繊維が母材から引き抜かれる際の荷重-開口幅関係を求める。

2.3.1 剥離過程

剥離過程とは、繊維-母材間の付着が破壊されていく過 程を表す。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 として荷重点作用変位が生じることになる。

両側からの引抜き挙動を考えると、ひび割れ面に対し て、繊維の埋め込み長は両側で異なる。引抜きに伴う界 面結合切れは両側で埋め込み側端部に向かって進んでい き、両側の弾性伸びにより開口幅が生じる。

繊維の引抜き挙動は、すべり、繊維軸歪み、繊維軸力 を考えることにより以下のように得られる³⁾。

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

ここに、P:引抜き荷重(N)、E_f:繊維弾性係数(MPa)、d_f: 繊維径(mm)、 τ :繊維-母材間の付着強度(MPa)、 δ :開口 幅(mm)、 δ_0 :剥離が終わる時の開口幅(mm).

2.3.2 すべり過程

繊維-母材間の剥離が全て終わると繊維全体のすべり 出しが始まる。すべり出しが始まると、繊維の全埋め込 み長に渡って界面摩擦が始まることになる。荷重点作用 変位は繊維全体のすべり出し量に等しい。すべり出し量 が埋め込み長さに至ったら繊維は完全に引き抜かれるこ とになる。すべり過程においては剥離過程における弾性 伸び変位に比較して、すべり出し変位の方が大きいため、 弾性伸び変位は無視される。すなわち、すべり出し変位 が開口幅となる。以上より、繊維の引抜きの挙動は以下 のようになる。

$$\mathsf{P}(\delta) = \pi \ \tau \ \mathsf{d}_{\mathsf{r}} \ell \bigg[1 - \frac{\delta - \delta_0}{\ell} \bigg] \ \text{for} \ \delta_0 < \delta \le \ell$$

ここに、ℓ:埋め込み長さ(mm).

2.4 繊維-母材間の付着強度

ECCにおいて、水の影響により最も変化すると思われるパラメータは繊維-母材間の付着強度である。

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 化学付着が破壊され付着強度は低下していく。つまり、 付着強度が限界値 τ_s となると、そこから徐々に弱まって 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。それが摩擦付着強度 τ_i となる。つまり、すべり過程での付着強度は一定とな る。

以上の付着破壊の現象を相対変位の関数で表すと以下 のようになる。

剥離過程

$$\begin{aligned} \tau_{0} &= \tau_{s} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_{0\tau}} \right)^{2} \right\} \quad \left(\Delta \leq \Delta_{0\tau} \right) \\ \tau_{0} &= \tau_{s} \left\{ \left(1 - \frac{\tau_{i}}{\tau_{s}} \right) \exp \left[\alpha_{\tau} \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_{0\tau}} \right) \right] + \frac{\tau_{i}}{\tau_{s}} \right\} \quad \left(\Delta > \Delta_{0\tau} \right) \end{aligned}$$

すべり過程

 $\tau_0=\tau_i$

ここに、 τ_s :化学付着強度(MPa)、 τ_i :摩擦付着強度(MPa)、 Δ :繊維-母材間の相対変位.、 $\Delta_{0\tau}$ 、 α_{τ} :付着強度に関す る係数.

2.5 繊維の破断

母材との強い化学付着が存在する場合や繊維強度が小 さい繊維では、繊維の破断を無視することができない。 2.2 節でも触れたように、本研究では、繊維の破断は軸方 向応力が破壊強度に達した時に生じる、と仮定した。

また、配向角が存在する場合は、引抜き抵抗力が増加 するため繊維にかかる応力が増大し、破断の可能性が高 くなる。繊維の架橋部の端部における集中応力による界 面摩擦力の増加により、繊維表面が損傷を受け、繊維強 度が低減する可能性もある。これらの影響は、見かけ上 の繊維強度低下として、配向角による繊維強度低減係数 f'を導入し、次式で表現される³⁾。

$$\sigma_{\rm fu} = \sigma_{\rm fu}^{\rm n} e^{-f'\phi}$$

ここに、 σ_{fu} :見かけの繊維強度、 $\sigma_{fu}^{n}: \phi=0$ における見かけの繊維強度、f':見かけの繊維強度低減係数.

2.6 スナビング効果

ECC 中において、繊維はランダムに分散しているため、 ひび割れに対して常に直角にはならず、何らかの配向角 を有している。このような場合、引抜き荷重は繊維の架 橋部の端部における集中応力及び繊維-母材界面のせん 断応力によって抵抗される。この集中応力により、見か け上界面摩擦が強化され、引抜き抵抗性能が増大する。 この現象をスナビング効果と呼び、スナビング係数fを 導入し、以下の式で表される³。

$$\mathbf{P}(\phi) = \mathbf{P}_0 \mathbf{e}^{\mathrm{f}\phi}$$

ここに、**P**(φ):見かけの引抜き荷重(**N**)、**P**₀: φ =0 における 引抜き荷重(**N**)、**f**:スナビング係数.

2.7 多繊維の架橋応力-開口幅関係

2.3 節では、単独の繊維における引抜き荷重-開口幅関 係を導いたが、ひび割れ面では多数の繊維が存在する。 以下に、多繊維におけるひび割れ架橋応力-開口幅関係を 導く。

多数の繊維がランダムな配置と配向で分散しているこ と、さらに繊維の破断とスナビング効果をまとめると、 架橋応力-開口幅の関係は以下のようになる。

$$\sigma = \frac{\mathbf{V}_{f}}{\mathbf{A}_{f}} \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{z=0}^{\frac{L_{f}}{2}} \mathbf{P}(\delta, \mathbf{l}) e^{f\phi} \mathbf{p}(\phi) \mathbf{p}(z) dz d\phi$$

ここに、 σ :架橋応力(MPa)、 V_f :繊維体積混入率、 A_f :繊 維の断面積(mm²)、 L_f :繊維長(mm)、P:引抜き荷重(N)、 $p(\phi)$ 、p(z):確率密度関数、f:スナビング係数.

以上の引抜き荷重、付着強度、架橋応力を表-1の物性 値を用いて出力すると図-1~図-4のようになる。

3. マルチプルクラック生成条件の検討

3.1 概要

ECC に初期ひび割れが発生すると、架橋応力は一定の 値を保ちながらひび割れは徐々に進行していく。その後、 定常ひび割れ条件により、初期ひび割れとは異なるひび 割れ(マルチプルクラック)が発生する。マルチプルク



図-2 剥離過程における付着強度-相対変位関係



図-3 すべり過程における付着強度-相対変位関係





ラックの役割は、初期ひび割れにより局所的に損傷を発 生させるのではなく、ECCの全体に渡ってひび割れを分 散させることである。そのため、局所的なひび割れ破壊 を防ぐことができる⁴⁾。

3.2 生成条件

	表-1	物性值 4)
--	-----	--------

繊維長 L _t (mm)	12
繊維径 d _f (mm)	0.037
繊維弾性係数 E _f (MPa)	40200
見かけの繊維強度 σ _{fu} n(MPa)	1343
摩擦付着強度τ _i (MPa)	2.01
化学付着強度 τ_{s} (MPa)	31.3
繊維混入量 V _f (%)	1.5
スナビング係数 f	0.5
見かけの繊維強度低減係数 f'	0.3
母材の弾性係数 E _m (MPa)	15900
母材の破壊靱性 K _m (MPa mm ^{0.5})	6.989



図-5 マルチプルクラック発生時の J_b', J_{tip}

マルチプルクラックは以下の条件で発生する。

$$\frac{J_{b}'}{J_{tip}} > 1$$

$$J_{tip} = \frac{K_{m}^{2}}{E_{m}} \quad (MPa \cdot mm)$$

$$J_{b}' = \sigma_{peak} \delta_{peak} - \int_{0}^{\delta_{peak}} \sigma_{c}(\delta) d \delta \quad (MPa \cdot mm)$$

ここに、 E_m :母材の弾性係数(MPa)、 K_m :母材の破壊靭性 (MPa·mm^{0.5})、 σ_{peak} :最大架橋応力(MPa)、 δ_{peak} : σ_{peak} に対応する開口変位(mm)、 σ_c (δ):架橋応力-開口変位関係.

J_b'/J_{tip} はエネルギー指標として定義され、高靱性 FRC の終局ひずみと相関があることがわかっている。すなわ ち、J_b'/J_{tip} が 1 を超えて大きくなるほどマルチプルクラ ックの密度が大きくなり、終局ひずみが増加することに なる。そして3程度の値を超えるとマルチプルクラック の密度はほぼ飽和する。

3.3 パラメータ毎のマルチプルクラック発生条件の比 較

水の影響により、繊維、母材、そして繊維-母材界面に おけるパラメータが変化し、マルチプルクラックの発



図-7 τ_i 、 τ_s を変化させたときの J_b'/J_{tip} の値 (τ_i に着目)

生に影響が出ると予想された。具体的に変わると考えら れるパラメータは K_m 、 τ_i 、 τ_s である。これらの値を変 化させていき、どのような状態でマルチプルクラックが 生じやすいかを検討する。

水の影響下においては、一般的にコンクリートは損傷 しやすい。よって、ECC も水の影響により損傷しやすく、 マルチプルクラックの発生が少なくなると予想される。 つまり、水の影響により K_m 、 τ_i 、 τ_s は減少すると予想 される。表-1 の繊維物性を用いると、 J_b'/J_{tip} =5.947 とい う値が得られた。この値を基準として、3 つのパラメー タを 1 つずつ変化させ、 J_b'/J_{tip} がどのように変化するか の確認を行った。その結果を表-2 に示す。

結果は、それぞれのパラメータの値を増加させること により、J_b'/J_{tip} は減少した。逆にパラメータを減少させ ると J_b'/J_{tip}の値は増加した。そして表-2 より、3 つのパ ラメータの値を元の値より2倍程度にすると3を下回っ た。また、3 つのパラメータの値を元の値と比べて3倍 程度にすると1以下となった。

次に、 τ_s 、 τ_i の値を同時に変化させ J_b'/J_{tip} がどのように変化するかの確認を行った。結果を図-6 と図-7 に示 す。図-6 は τ_s の値を変化させた時の J_b'/J_{tip} の挙動に着目 し、図-7 は τ_i の値を変化させた時の J_b'/J_{tip} の挙動に着目 した。一つのパラメータのみを変化させたときと同様に、 τ_s 、 τ_i が減少すると J_b'/J_{tip} の値は増加し、 τ_s 、 τ_i が増

表-2 J_b'/J_{tip}毎の各パラメータの値

	$J_b'/J_{tip} < 1$	$1 < J_b' / J_{tip} < 3$	元の値
K _m (MPa mm ^{0.5})	17~	10~17	6.989
τ_i (MPa)	6.33~	4.61~6.33	2.01
τ _s (MPa)	94~	69~94	31.3

加すると J_b'/J_{tip}の値は減少した。K_mについても同様の結 果が得られた。

以上の結果より、水の影響により ECC はマルチプルク ラックが起こりやすくなる結果が得られた。つまり、引 張応力が作用している時は水の影響により ECC が損傷 するとは考えられない結果となった。

4. あとがき

本研究では、引張応力が作用する時に水の影響下において変化すると考えられる繊維、母材、繊維-母材間界面のパラメータの推定をし、それらのパラメータを変化させることでマルチプルクラック生成条件を検討した。

結果からは、化学付着強度、摩擦付着強度、母材の破 壊靭性の値が減少するにつれてマルチプルクラックが起 こりやすくなる結果が得られた。つまり、ECC に引張応 力が作用しているときは、水の影響により ECC が損傷す るとは考えられない結論に至った。

今後の課題としては以下が挙げられる。水の存在下に おいて ECC に分布荷重が作用した時に、水圧によりひび 割れにくさび荷重が作用すると考えられる。その際の、 ECC の損傷の検討をすることが必要と考えられる。

【参考文献】

- 全邦釘:繊維の破断を考慮した架橋応力劣化則のモデル化と ECC の疲労実験による検証、東京大学卒業 論文、pp1-35、2003.3.
- 川崎紘誉:マイクロメカニクスモデルに基づく鋼繊 維の線形形状の最適化、東京大学修士論文、pp45-67、 2002.3.
- 3) 清田雅量、三橋博三、閑田徹志、川又篤:繊維補強 セメント系複合材料における単繊維の引抜抵抗性能 に関する実験的研究、セメントコンクリート論文集、 Vol.56、pp.625-632、2002.
- (期田徹志、Li Victor C、浜田敏裕:ビニロンを用いた高靭性 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.