

# 論文 高塩分環境における UFC の引張性能に関する限界ひび割れ幅の考察

上松瀬 慈\*1・横田 弘\*2・橋本 勝文\*3・河野 克哉\*4

**要旨:** 高塩分環境下にあり初期ひび割れが生じた UFC について、初期ひび割れ幅および曝露期間により決定される引張軟化モデルの構築を行った。このモデルを用いることで、UFC 梁の一点集中曲げ載験の結果を良好に再現することができた。このモデルを用いた感度分析から、鋼繊維の腐食により UFC の引張性能が維持される場合と低下する場合が初期ひび割れ幅に依存することがわかった。さらに、健全状態の UFC への初期ひび割れの導入を再現した有限要素解析により、ひび割れ発生状況の観点から考察を加え、腐食環境下において UFC 部材が長期にわたって鋼繊維による引張抵抗性を発揮するための初期ひび割れ幅の限界値を提案した。

**キーワード:** 超高強度繊維補強コンクリート, 引張軟化曲線, 有限要素解析, 初期ひび割れ幅, 腐食

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）は高強度の鋼短繊維の混入により引張特性を向上させ、高強度、耐久性、高じん性、高流動性を実現した材料である。UFC 内部の鋼繊維は緻密なセメントマトリクスによって保護され、塩化物イオンの浸透に対して極めて高い抵抗性を有することが報告されている<sup>1)</sup>。しかし、ひび割れた UFC が高塩分環境下に曝露される場合、ひび割れを通して塩化物イオンが浸入することにより、ひび割れを架橋する鋼繊維が腐食することで期待される引張性能が発揮できなくなることが考えられる。このような理由から、UFC は使用状態においてひび割れの発生が許容されていない<sup>1)</sup>。

一方、UFC は自己収縮が増大しやすく、施工段階においてひび割れが生じやすいといった課題が指摘されている<sup>1)</sup>。そのため、ひび割れおよび鋼繊維の腐食の影響を考慮した UFC の力学性能、特に鋼繊維により発揮される引張性能を精査することが必要である。

本論文では、UFC 供試体を用いた検討結果に基づき、ひび割れ幅および海水浸漬期間によって決定される引張軟化モデルの構築を行う。このモデルを用いて任意のひび割れ幅および長期的な海水浸漬の影響を予測することにより、高塩分環境下に曝露される UFC 部材の初期ひび割れの限界値を、引張抵抗性維持の観点から提案することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

使用材料は低熱ポルトランドセメント（LC）、シリカフェューム（SF）、珪砂（S）とし、鋼繊維（F）を体積比 2% で混入した。混和剤には高性能減水剤を使用

表-1 使用材料

種類	名称	略号	物性or成分
結合材 (B)	低熱セメント	LC	比表面積3330cm <sup>2</sup> /g, 密度3.22g/cm <sup>3</sup>
	シリカフェューム	SF	比表面積10m <sup>2</sup> /g, 密度2.40g/cm <sup>3</sup>
細骨材	珪砂	S	最大寸法0.6mm, 密度2.61g/cm <sup>3</sup>
短繊維	鋼繊維	F	Φ0.2×15mm, 密度7.85g/cm <sup>3</sup>
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 配合、フロー値および圧縮強度

W/B (%)	V <sub>f</sub> (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )						Flow (mm)	f <sub>c</sub> ' (N/mm <sup>2</sup> )
		W	LC	SF	S	F	SP		
13.2	2.0	180	1146	214	927	157	24	277	210

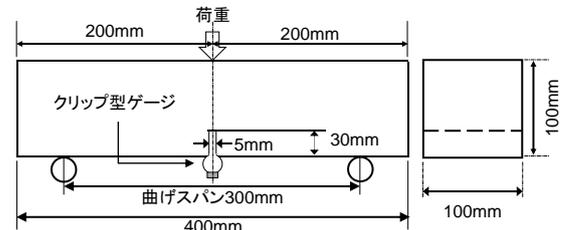


図-1 供試体の形状・寸法および曲げ試験の概要

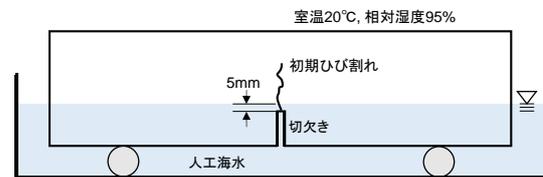


図-2 海水浸漬試験の概要

した。表-1 に使用材料、表-2 に配合、フロー値と圧縮強度の実測値を示す。なお、Furnas の最密充填理論による簡易計算<sup>2)</sup>に基づき粉体構成は LC : SF=8 : 2 (体積比) とした。JCI-S-001-2003「切欠きはりを用いた繊維コンクリートの荷重・変位曲線試験方法」に準拠し

\*1 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (学生会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 教授 博士(工) (正会員)

\*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 助教 博士(工) (正会員)

\*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博士(工) (正会員)

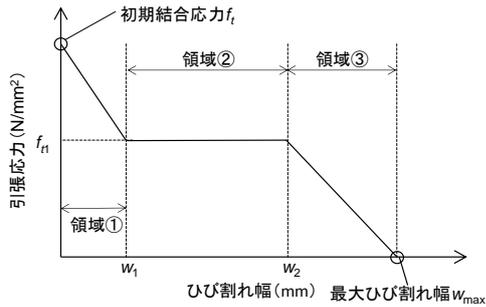


図-3 3直線近似による UFC の引張軟化モデル

図-1 に示す角柱供試体を作製した。打設後、室温 20°C、24 時間の封緘養生終了後に昇温速度 15°C/hr、最高温度 90°C、最高温度保持時間 48 時間、降温速度 15°C/hr の蒸気養生を行った。養生終了後、スパン中央にコンクリートカッターを用いて幅 5mm、深さ 30mm の切欠きを導入した。本論文では、以下に示す各水準に対して供試体数をそれぞれ 2 体とした。

## 2.2 ひび割れの導入

切欠き導入後、図-1 に示すように、スパンを 300mm として 3 点曲げ試験を行い、初期ひび割れの導入を行った。本論文では、切欠き肩口に取り付けたクリップ型ゲージで測定される肩口開口変位（以下、CMOD）をひび割れ幅として取り扱う。除荷後の残留ひび割れ幅が 0.1mm、0.5mm および 1.0mm となるよう荷重制御にて載荷した。また、ひび割れを有さない（ひび割れ幅 0.0mm）供試体も準備した。

## 2.3 海水浸漬試験

図-2に初期ひび割れを導入した供試体の海水浸漬試験の概要を示す。人工海水には医薬品GMPに準じた粉体製品を使用した。切欠き端部から5mmの高さまで海水に浸漬し、ひび割れへの海水成分の浸透を模擬した。浸漬期間は3、6および12monthsの3水準とし、浸漬期間中、人工海水は1monthに1回の頻度で全量交換した。また、海水浸漬を行わない（0month）供試体も準備した。

## 2.4 曲げ試験

ひび割れの導入および海水浸漬試験終了後に再び 3 点曲げ試験を行い、得られた荷重-CMOD 曲線を用いて引張軟化曲線を同定した<sup>3)</sup>。本論文では、初期ひび割れを導入した供試体における荷重-CMOD 曲線、引張軟化曲線、および後述するモデルは、既にひび割れが発生している UFC の材料特性として取り扱う。引張軟化曲線の推定にあたって、日本コンクリート工学会にて公開されているプログラム<sup>4)</sup>を使用した。本論文では、同プログラムによる数値解析について、荷重-CMOD 曲線から引張軟化曲線を推定することを逆解析、引張軟化曲線あるいは引張軟化モデルから荷重-CMOD 曲線を同定することを順解析と記述する。

## 3. 引張軟化曲線のモデル化と FEM 解析

### 3.1.3 直線モデルと定式化

著者らは、これまでの研究<sup>5)</sup>において実験から得られた引張軟化曲線を、初期結合応力以降に応力が変化する領域（領域①）、鋼繊維の架橋効果によって引張応力が一定に保持される領域（領域②）、その後ひび割れ幅の増加に伴い引張応力が線形的に低下する領域（領域③）からなる 3 直線近似によってモデル化した。図-3にこのモデルを示す。また、このモデルを構成する各点について、ひび割れ幅が 0.0mm での最大引張応力を初期結合応力  $f_t$ 、鋼繊維の架橋効果により一定の値が保持される領域の架橋保持応力  $f_{t1}$ 、その領域の始点と終点のひび割れ幅を架橋保持始点  $w_1$  および架橋保持終点  $w_2$ 、そして引張応力が 0kN/mm<sup>2</sup> になると想定される最大ひび割れ幅  $w_{max}$  とし、各パラメータについて、初期ひび割れ幅および浸漬期間を説明変数  $x_1$  (mm)、 $x_2$  (month) を用いて式(1)~(5)に示す定式化を行った。

$$f_t = -0.82x_1x_2 - 7.92x_1 + 1.03x_2 + 12.84 \quad (1)$$

$$f_{t1} = -0.95x_1x_2 + 4.46x_1 + 0.13x_2 + 8.94 \quad (2)$$

$$w_1 = -0.01x_1x_2 + 0.01x_1 - 0.01x_2 + 0.17 \quad (3)$$

$$w_2 = -0.03x_1x_2 - 0.30x_1 + 0.01x_2 + 0.63 \quad (4)$$

$$w_{max} = 0.72x_1x_2 - 1.57x_1 - 0.05x_2 + 2.61 \quad (5)$$

ただし、既報で報告したとおり、最大ひび割れ幅については実験から得られる引張軟化曲線と引張軟化モデルに差が生じており<sup>5)</sup>、本モデルでは最大ひび割れ幅を十分に表現できていない。

### 3.2.3 直線モデルの解析結果と考察

上述の 3 直線モデルから得られる順解析の結果を修正前の解析結果とし、曲げ試験から得られた荷重-CMOD 曲線と重ねたものを図-4 に示す。なお同図にはここでの考察を基に、3 直線モデルに対して修正処理を検討した引張軟化モデルを用いた順解析の結果も掲載するが、これについては後述する。

修正前の解析結果のプレピーク領域において、初期ひび割れ幅が 0.0mm および 0.1mm の場合には弾性域を越えた後に荷重の増加に伴う CMOD の増加率が著しく小さく、実験結果と比較してピーク荷重が突出した形となる。これは、3 直線モデルにおいて領域①を考慮するためであると考えられ、特に初期ひび割れ幅を 0.0mm とした場合においては実験結果と異なり、浸漬期間の増加と共にピーク荷重の増加が顕著になる。

一方、ポストピーク領域において、特に初期ひび割れ幅 0.0mm と 0.1mm の場合 CMOD の増加に伴う荷重の減少が顕著である。この原因としては実験から得られる引張軟化曲線と 3 直線モデルの最大ひび割れ幅に差があることが原因であると考えられる。また、初期

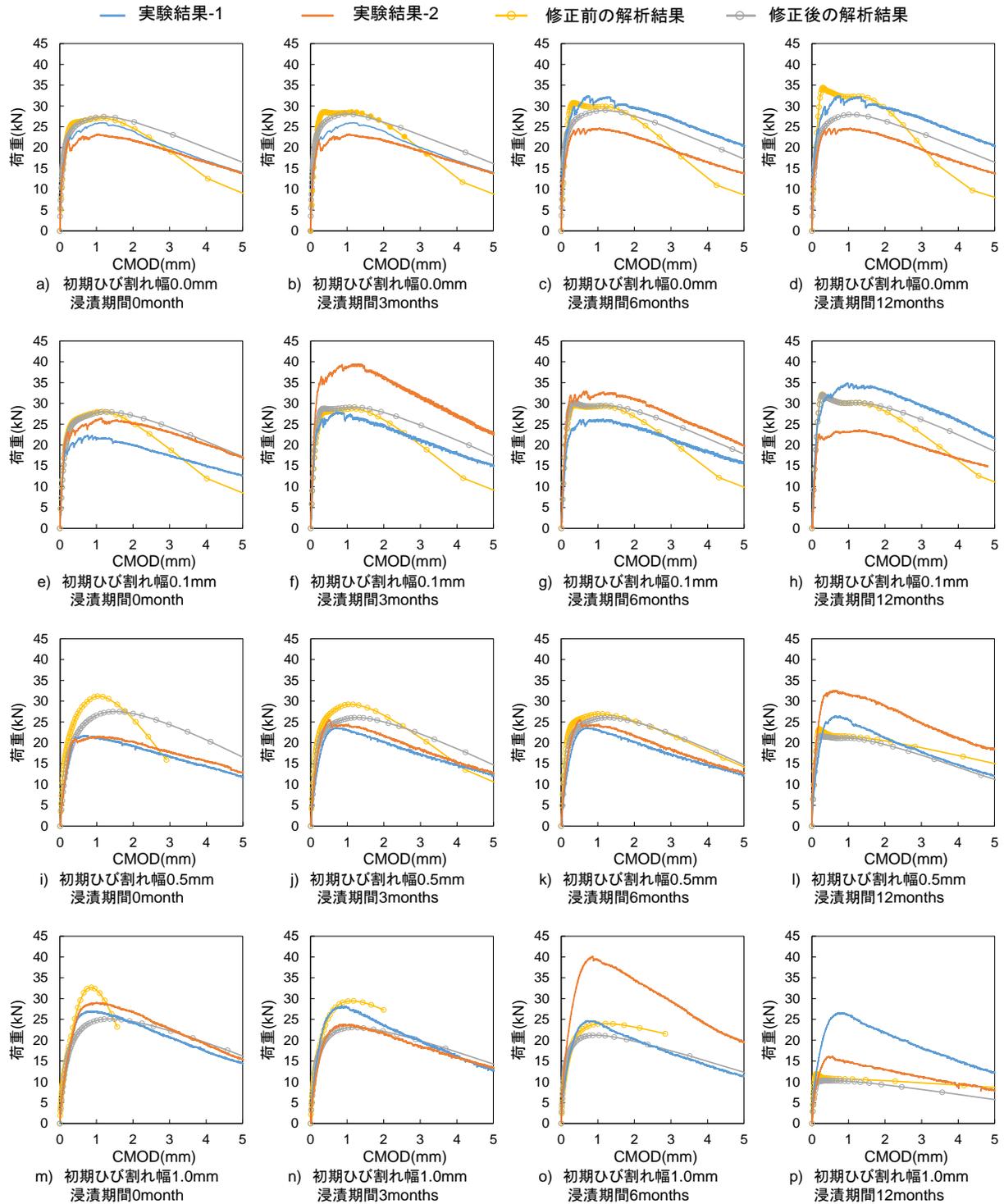


図-4 実験結果および解析結果の荷重-CMOD 曲線

ひび割れ幅を 0.5mm, 浸漬期間を 0month とした場合 (図-4 i) および初期ひび割れ幅を 1.0mm, 浸漬期間を 0, 3, 6months とした場合 (図-4 m), n), o) においては解析によって出力される CMOD の範囲が 1.5~3mm 程度である。これらは全て引張軟化モデルの領域①において架橋保持応力が初期結合応力を上回っている場合に見られる傾向であった<sup>5)</sup>。

以上のことから, 3.1 に示した解析結果と実験結果に

は多くの相違が生じている場合があるので, 次節では提案する引張軟化モデルの修正を検討する。

### 3.3 引張軟化モデルの修正

図-5 に 3 直線モデルの修正から新たなモデル構築までの修正フローを示す。

【手順 1】3 直線モデルにおける最大ひび割れ幅の修正  
 全ての水準において, 3.1 に示した手順で従来通りに 3 直線モデルの作成後, 本手順による修正を行う。

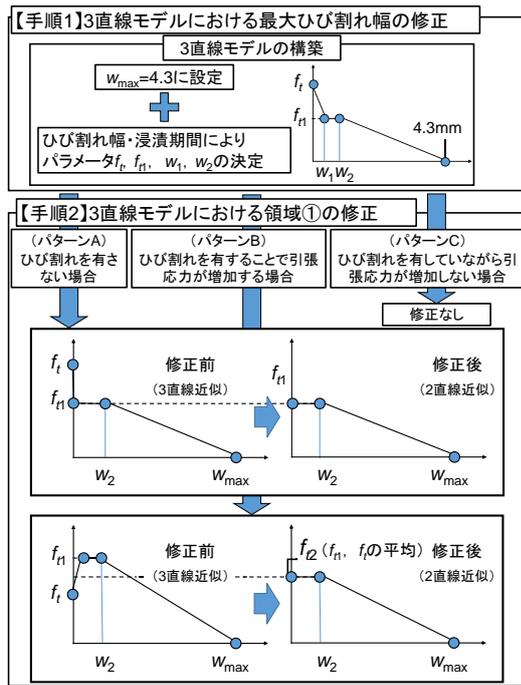


図-5 引張軟化モデルの構築・修正フロー

引張軟化モデルを構成するパラメータ  $f_t$ ,  $f_{t1}$ ,  $w_1$  および  $w_2$  を式(1)~(4)によって算出する。最大ひび割れ幅の設定については式(5)による計算を行わず、一律に  $w_{max}=4.3\text{mm}$  と仮定する。これは、腐食の影響を考慮しない既往の2直線モデル<sup>2)</sup>に倣ったものである。

#### 【手順2】3直線モデルにおける領域①の修正

A. ひび割れを有さない場合、B. ひび割れを有することで引張応力が増加する場合、あるいは C. ひび割れを有しているながら引張応力が増加しない場合にパターン分けして本手順による修正を行う。

ひび割れを有さない場合(パターン A)：曲げ荷重によりひび割れが生じる際、引張応力の負担がセメントマトリクスから供試体内部の鋼繊維へ瞬間的に切り替わると考えられる。そのため、初期結合応力から架橋保持が始まる応力にかけての開口変位が無視できるほど小さく、そのため領域①の挙動を考慮せず、 $f_{t1}$ ,  $w_2$ ,  $w_{max}$  により構成される2直線近似によって表現する。

ひび割れを有することで引張応力が増加する場合(パターン B)：この挙動はひび割れ導入後に再び荷重することにより、繊維が再度引っ張られるまでの過程を表現しているものと考えられる。そのため、本来開口と同時に繊維の架橋によって発揮されると考えられる引張応力が過大に評価され、順解析における計算が収束しなくなったと考えられる。そのため、架橋保持応力  $f_{t2}$  を変化させて検討した結果、初期結合応力  $f_t$  と架橋保持応力  $f_{t1}$  の平均値とすることで比較的よい一致をみた。そこでこれを新たな架橋保持応力  $f_{t2}$  とし、 $w_2$ ,  $w_{max}$  によって構成される2直線近似によって表現する。

ひび割れを有しているながら引張応力が増加しない場合(パターン C)：修正処理を行わない。

以上の修正処理を施した引張軟化モデルを用いた順解析結果を図-4に「修正後の解析結果」として示す。

### 3.4 修正引張軟化モデルを用いた解析結果

修正後の解析結果のプレピーク領域においては、初期ひび割れを  $0.0\text{mm}$  とした場合においては、修正手順2においてパターン A の修正を行うことで弾性域を越えた後に荷重の増加に伴う  $\text{CMOD}$  の増加率が大きくなり、その後、緩やかにピーク荷重を迎える。一方で、初期ひび割れ幅を  $0.1\text{mm}$  とした場合(パターン C)では、手順2における修正を行わず領域①の挙動を考慮することにより、ピーク荷重がわずかに突出する挙動のままとなるが、これは実験結果のピーク荷重到達時の挙動(繊維の架橋および引抜け)を忠実に表現している。特に、ひび割れを架橋する鋼繊維が人工海水に曝露されることで腐食し、さらに、腐食生成物が鋼繊維とセメントマトリクスの界面を充填することで、セメントマトリクスからの鋼繊維の引抜き抵抗性が向上したことを表すことができていると考えられる。

ポストピーク領域に着目すると、修正手順1を行うことで実験結果と同様の勾配で  $\text{CMOD}$  の増加に伴い緩やかに荷重が減少する挙動を忠実に再現している。また、初期ひび割れ幅を  $0.5\text{mm}$ 、浸漬期間を  $0\text{month}$  および初期ひび割れ幅を  $1.0\text{mm}$ 、浸漬期間を  $0, 3, 6\text{months}$  とした場合には修正手順2においてパターン B の修正を行うことで、解析によって  $\text{CMOD}$  が  $5\text{mm}$  付近まで出力が可能となった。特に初期ひび割れ幅を  $0.5$  および  $1.0\text{mm}$ 、浸漬期間  $0\text{month}$  とした場合には、実験値と解析値のピーク荷重の差異が減少した。これは、初期結合応力と架橋保持応力の平均化によって架橋保持応力が低下したためであると考えられる。

以上のように本論文にて提案する引張軟化モデルは、曲げ荷重試験結果を良好に再現している。今後さらに高精度化を図ることで、FEM 解析等を使用した UFC の設計・照査において、ひび割れ界面要素の構成則として応用し得る可能性を有しているといえる。

## 4. UFC の引張性能に関する限界ひび割れ幅

### 4.1 海水浸漬に伴う引張軟化モデルの推移

実験で検討した試験水準について、本論文の手法によって構築された引張軟化モデルを図-6に示す。

初期ひび割れ幅  $0.0\text{mm}$  の場合、引張軟化モデルの形状は2直線を保ちながら、浸漬期間の増加に伴い架橋保持応力がわずかに増加する。初期ひび割れ幅  $0.1\text{mm}$  の場合、引張軟化モデルの形状がひび割れの導入直後(浸漬期間  $0\text{month}$ )において3直線となり、その後浸

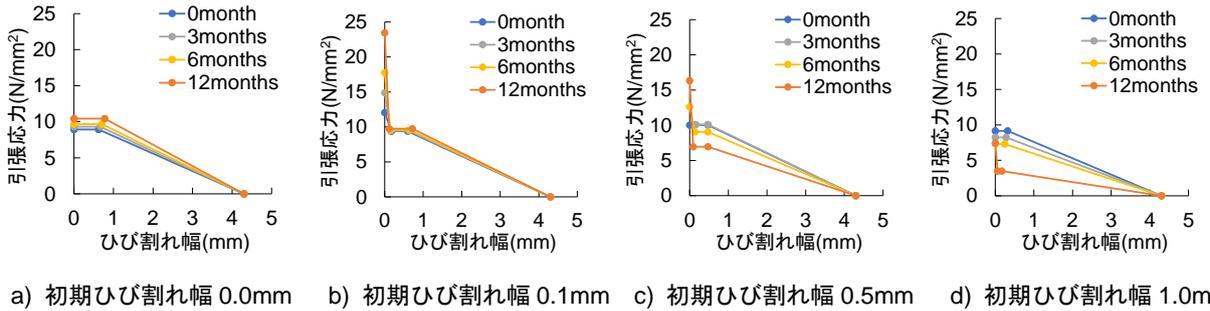


図-6 海水浸漬による引張軟化モデルの推移

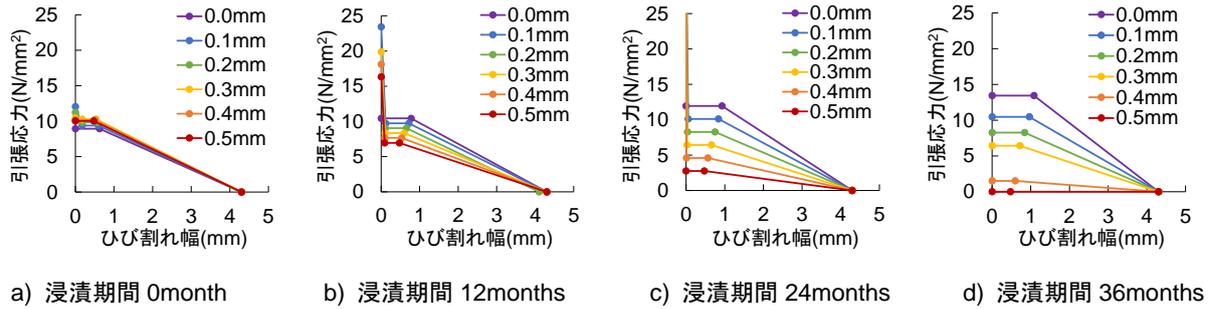


図-7 初期ひび割れ幅による長期的引張性能の感度分析

漬期間の増加に伴う引張軟化モデルの形状は変化せず、初期結合応力が増加するものの架橋保持応力の変化は生じない。一方、初期ひび割れ幅 0.5mm 以上の場合にはひび割れの導入直後において引張軟化モデルの形状は2直線となり、その後浸漬期間の増加に伴い3直線へと推移する。引張軟化モデルの形状が変化した後、初期結合応力については浸漬期間の増加に伴い増加するが、架橋保持応力については引張軟化モデルの形状に拘わらず浸漬期間の増加とともに減少を続ける。

海水浸漬を経て UFC の引張抵抗性が維持される場合と低下する場合が初期ひび割れ幅に依存することから、海水に長期曝露される UFC が鋼繊維によって長期にわたり引張抵抗性を発揮するためには部材に発生するひび割れ幅を一定の値（閾値）以下とする必要がある。本論文の検討では 0.1~0.5mm の範囲にその閾値があると考えられる。

#### 4.2 引張軟化モデルによる長期的引張性能の感度分析

任意のひび割れ幅における長期的な引張性能の予測を目的とし、浸漬期間を 12months 毎に、初期ひび割れ幅を 0.1mm 毎に変化させた場合の引張軟化モデルの形状を図-7 に示す。ここで、引張軟化モデルを構成する各パラメータが負の値となったときは、その値を 0 とした。浸漬期間 0month においては、初期ひび割れを導入した場合に、初期結合応力および架橋保持応力が初期ひび割れ幅 0.0mm の場合を上回っている。浸漬期間 12months 以降においては、初期ひび割れ幅 0.1mm の場合は健全時（初期ひび割れ幅 0.0mm かつ浸漬期間 0month）と比較して初期結合応力はわずかに低下する

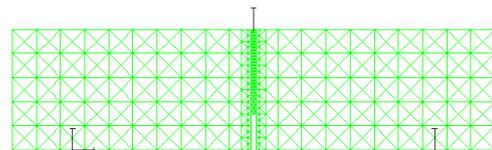


図-8 供試体の構造解析モデル

表-3 材料特性

圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	210.0
引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	8.9
ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	59500
ポアソン比	0.2
せん断保有係数 $\beta$	0.2

ものの架橋保持応力が変化しない。よって、海水中に長期的曝露される場合においても健全時の UFC と同等の引張抵抗性が長期的に発揮されるといえる。初期ひび割れ幅 0.2mm 以上の場合、浸漬期間 12months 以降に初期ひび割れ幅の増加に伴って架橋保持応力が低下するが、初期ひび割れ幅が 0.4mm 以上になると、24months 以降の架橋保持応力の低下が顕著である。また、初期ひび割れ幅 0.5mm の場合、浸漬期間 36months で引張抵抗性を維持できない結果となった。一方、初期ひび割れ幅 0.3mm までの場合には、海水中への曝露によって健全時と比較して引張性能がわずかに低下するものの、24months 以降も架橋保持応力が低下しにくいことから、本論文での検討範囲において、長期的な海水浸漬を受ける UFC が引張性能を発揮するための初期ひび割れ幅の限界値として 0.3mm を提案する。

#### 5. 初期ひび割れの発生状況に基づく考察

本論文で提案した限界ひび割れ幅について、ひび割

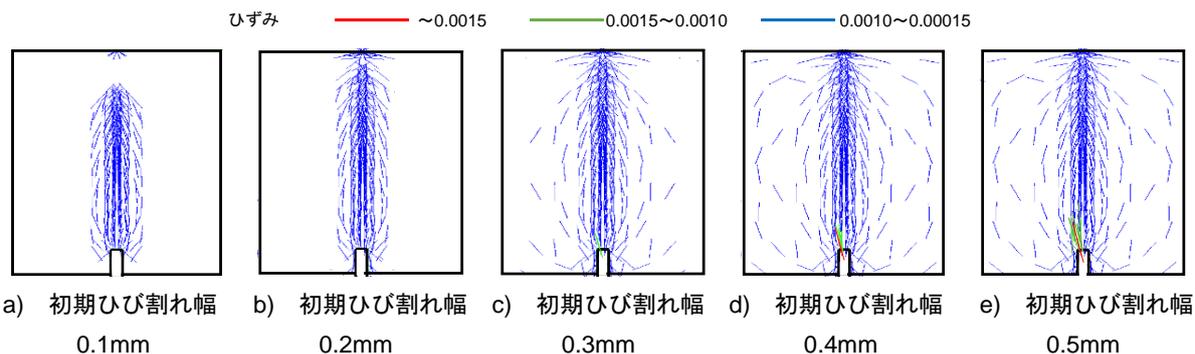


図-9 ひび割れ発生状況の解析結果

れ導入時における発生状況の観点から以下に考察する。既往の研究<sup>9)</sup>では、UFCの初期ひび割れ幅が大きくなるほど、内部に生じるひび割れ領域を拡大しながらひび割れ本数が増加することが報告されている。ここでは、初期ひび割れの導入試験を再現した有限要素解析によりひび割れ発生状況を明らかとすることを試みた。

解析に使用する UFC 供試体の構造解析モデルを図-8に、材料特性を表-3に示す。ひび割れ発生後のせん断剛性の低減率（せん断保有係数）を0.2とした。ひび割れの進展には分散ひび割れモデルを、ひび割れの発生基準には線形応力カットモデルを採用した。引張軟化特性には、本論文にて構築した健全時の引張軟化モデルを現行の設計・施工指針<sup>1)</sup>に準じて引張応力-ひずみ関係に変換したものを用いた。荷重は試験時の荷重制御過程に基づいて単調荷重とした。

解析から得られたひび割れ発生状況の解析結果を図-9に示す。同図では、各要素のガウス積分点にて算出される引張ひずみのうち、ひび割れ発生ひずみを超えた場合に、その主応力と直交方向に一律の長さで表示した仮想上のひび割れの発生状況を表現している。

初期ひび割れ幅0.1および0.2mmの場合は、ひび割れは切欠き端部上方の比較的限定された範囲に進展している。初期ひび割れ幅0.3mmの場合は、ひび割れが切欠き端部の上方から外側へと進展を開始していることがわかる。さらに、初期ひび割れ幅0.4mm以上の場合、切欠き端部において著しい損傷が形成されるとともにひび割れがより広範囲に進展している。ひび割れ領域の拡大および本数の増加は海水浸漬によるUFCの力学特性に影響すると考えられている<sup>9)</sup>。解析結果ではひび割れが広範囲に発生し始め、また切欠き端部においてもひずみが0.1%を超えるような損傷が生じ始める初期ひび割れ幅0.3mmの場合、塩化物イオンの浸入による鋼繊維の腐食が顕著に増加する閾値であると考えられる。つまり、UFCが長期にわたって引張抵抗性を発揮する初期ひび割れ幅の限界値として、本論文で提案する0.3mmは妥当であると考えられる。

## 6. まとめ

今回実施した実験および解析の範囲で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) ひび割れ幅および浸漬期間によって決定される既往の引張軟化モデルの修正処理を行った。
- 2) 新たに構築したモデルによって、UFC梁の一点集中曲げ荷重試験を良好に再現することができた。
- 3) 腐食環境に長期曝露される場合、UFC部材の初期ひび割れ幅の限界値として0.3mmを提案した。

なお、荷重履歴および部材寸法による引張軟化曲線への影響も考えられるので、今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー113号，2004
- 2) Furnas, C. C.: Grading Aggregates - I. - Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.23, No.9, pp. 1052-1058, 1931
- 3) 日本コンクリート工学会：多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュアル，コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会，2001
- 4) [http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci\\_standard/kitsutaka\\_dl.html](http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci_standard/kitsutaka_dl.html)
- 5) 上松瀬慈，横田弘，橋本勝文，河野克哉：鋼繊維の腐食を考慮した超高強度繊維補強コンクリートの引張軟化挙動のモデル化，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.14, pp.165-172, 2014
- 6) 河野克哉，川口哲生，横田弘，橋本勝文：初期ひび割れを通じて海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの力学特性と組成変化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.37, No.1, pp.283-288, 2015