

海洋環境下にあるひび割れが生じた UFC の引張軟化モデル

Tension softening model of cracked UFC under the marine environment

北海道大学大学院工学院 ○学生員 上松瀬 慈 (Shigeru Kamimatsuse)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 横田 弘 (Hiroshi Yokota)
 北海道大学大学院工学研究院 正 員 橋本 勝文 (Katsufumi Hashimoto)
 太平洋セメント (株) 正 員 河野 克哉 (Katsuya Kono)

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）は高強度の短繊維の混入により引張特性を向上し、高強度、耐久性、高じん性、高流動性を兼ね備えた材料である。構造部材に適用される UFC は部材断面の薄肉化、使用材料の削減、長期耐久性の向上などライフサイクルコストの低減に貢献できる建設材料として期待されている¹⁾。

UFC は本来、ひび割れ発生以降において、鋼繊維の架橋効果および引抜き抵抗性による高いじん性と引張力といった優れた力学特性を発揮するとされている。一方で、現行の設計・施工指針²⁾において、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。しかしながら、養生条件など種々の要因により生じる自己収縮に起因し、施工段階において部材にひび割れの発生が懸念される³⁾ことなどから、ひび割れ発生後の UFC における力学性能、特に鋼繊維により発揮される引張特性の精査が必要である。

海洋環境など高塩分環境下における適用範囲について、UFC の見かけの拡散係数は、通常の高強度コンクリートと比較して著しく小さく、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⁴⁾。しかしながら、海水中に曝露されたひび割れを毛管として塩化物イオンが浸入するなど、鋼繊維の腐食が発生することが考えられる。このような場合を想定し、海水浸漬を伴う UFC の力学特性の適切な評価が求められる。

ひび割れ発生以降に高強度・高じん性を示す UFC の引張特性の照査に関しては、引張強度が一定の値を保持される領域と線形的に応力が低下する領域によって構成される 2 直線近似の簡易的な引張軟化モデルが一般的に知られている⁵⁾。UFC の適用範囲の広がりとともにこの引張軟化モデルについて、上述のひび割れおよび海水作用による部材内部の鋼繊維の腐食の発生を考慮する必要があると考える。

以上の背景に基づき、本論文では複数水準のひび割れ幅および海水浸漬期間の履歴をもつ UFC 製梁供試体の曲げ試験結果から推定される引張軟化挙動のモデル化を行った。さらに、構築したモデルを用いて数値解析を行い、得られた曲げ荷重とひび割れ開口変位の関係について実際の曲げ試験結果との比較を行った。

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

表-1 使用材料

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

表-2 配合およびフロー値

W/B (%)	V _f (%)	単位量(kg/m ³)						Flow (mm)	f _c ' (N/mm ²)
		W	C	SF	S	F	SP		
13.2	2.0	180	1146	214	927	157	24	277	210

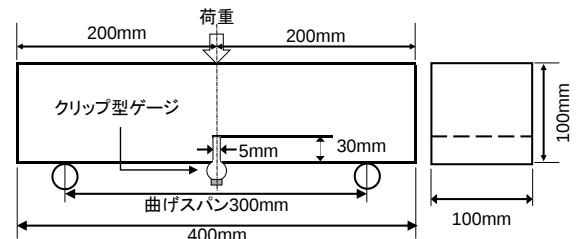


図-1 供試体の形状・寸法および曲げ試験の概要

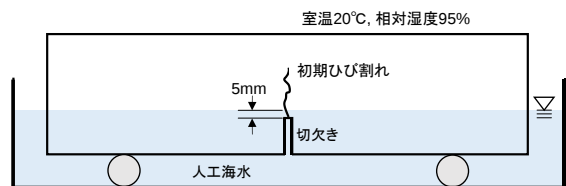


図-2 海水浸漬試験の概要

カフューム（SF）、珪砂（S）とし、鋼繊維（F）には、直径 0.2mm、長さ 15mm、 $\rho=7.84\text{g/cm}^3$ のものを使用した。また、混和剤には高性能減水剤を使用した。表-1 に使用材料、表-2 に配合、フロー値および圧縮強度を示す。なお、Furnas の最密充填理論による簡易計算³⁾に基づき粉体構成は LC : SF = 8 : 2（体積比）となっている。100×100×400mm の角柱供試体を JCI-S-001-2003 「切欠きはりを有した繊維コンクリートの荷重・変位曲線試験方法」に準拠して作製した。図-1 に供試体の形状・寸法を示す。打設後、室温 20℃、24 時間の封蔵養生終了後に昇温速度 15℃/hr、最高温度 90℃、最高温度保持時間 48 時間、降温速度 15℃/hr の蒸気養生を行った。養生終了後、供試体の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。

2.2. ひび割れの導入

養生終了後、図-1 に示す概要でスパン 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。本論文中においては、切欠き肩口に取り付けたクリップ型ゲージにより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目標のひび割れ幅である 0.1, 0.5 および 1.0mm となるよう荷重制御を行い、また、ひび割れを有さない（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。人工海水の作製には医薬品GMPに準じた粉体製品を使用した。切欠き上端から上方5mmの高さまで供試体を海水に浸漬し、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水準を設定した。浸漬期間中、人工海水は1ヶ月に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

初期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推定した⁴⁾。なお、これらの荷重-CMOD 曲線および引張軟化曲線は、既にひび割れが発生している UFC の材料特性として本論文では取り扱う。引張軟化曲線の推定にあたっては、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⁵⁾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⁶⁾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）から成る 3 直線近似によってモデル化した。図-3 にその概要図を示す。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引張応力 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/mm² 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。

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

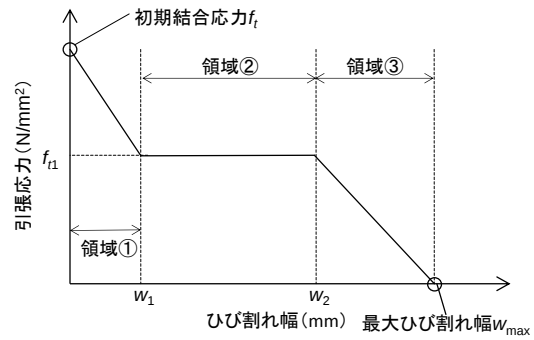


図-3 3 直線近似による UFC の引張軟化モデル

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

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

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

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

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⁶⁾、本モデルでは最大ひび割れ幅を表現できないと考えられる。

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、本節での考察を基に、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、これについては後に記述する。

修正前の解析結果のプレピークに着目すると、初期ひび割れ幅を 0.0 および 0.1mm とした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るが、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差が大きくなる。

一方、ポストピークに着目すると、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だと考えられる。また、初期ひび割れ幅を 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 2~3mm 程度である。これらは全て引張軟化モデルの領域①において引張応力が増加する場合であることを確認した⁶⁾。

以上のことから、3.1 に示した 3 直線モデルを用いた解析結果と実験結果には多くの相違が生じており、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

3 直線モデルの修正から新たなモデル構築までの手順

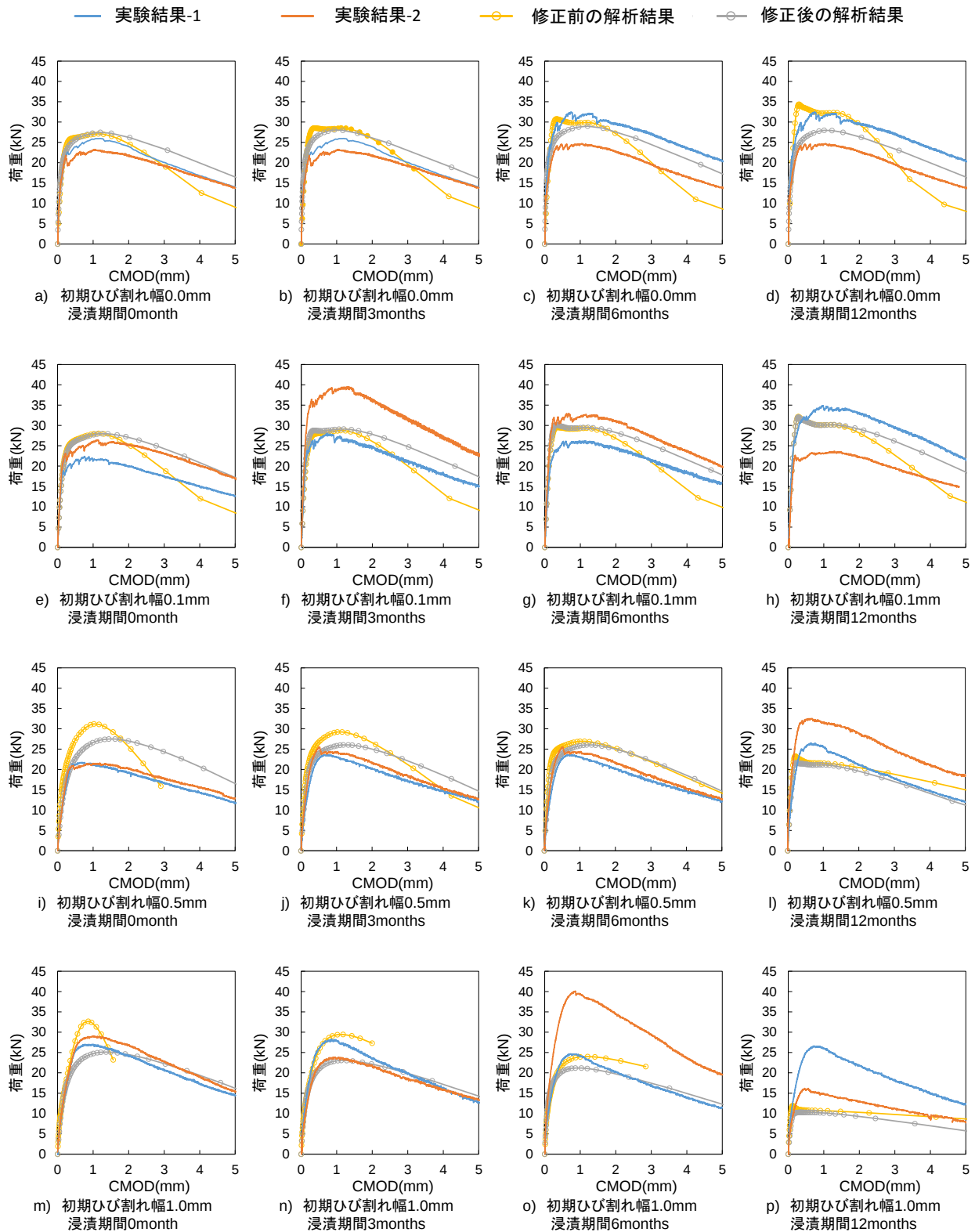


図-4 実験結果および解析結果の荷重-CMOD 曲線

を示す。図-5 に以下の手順 1 および 2 による修正フローを示す。

＜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。

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 については式(1)～(4)によって算出する。このとき、最大ひび割れ幅の設定について式(5)による計算を行わず、一律に $w_{max}=4.3mm$ とする。これは、腐食の影響を考慮しない既往の 2 直線モデル²⁾に倣った。

＜手順 2＞3 直線モデルにおける領域①の修正

ここでは、A. ひび割れを有さない場合、B. ひび割れ

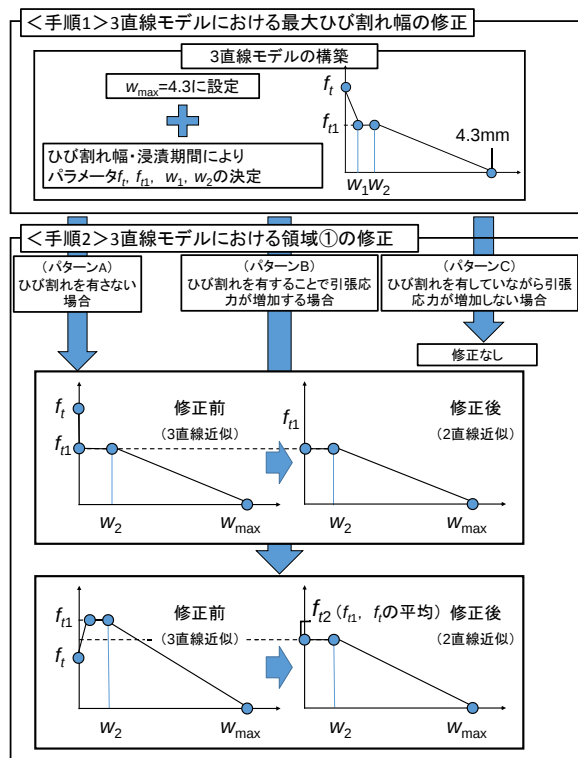


図-5 引張軟化モデルの構築・修正フロー

を有することで引張応力が増加する場合、C. ひび割れを有して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），曲げ荷重により割裂が生じる際，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と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始点にかけての開口変位が無視できるほど小さく，この場合には領域①の挙動を考慮せず， f_{t1} , 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，たわんだ繊維が緊張するまでの過程を表現しているものと考えられる．このことを考慮し，初期結合応力 f_t と架橋保持応力 f_{t1} の平均としたものを新たな架橋保持応力 f_{t2} とし， f_{t2} , 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こととする．

ひび割れを有して引張応力が増加しない場合（パターン C），別途修正処理を行わない．

前述の通り，以上の修正処理を行った後の引張軟化モデルを用いて順解析を行った結果を図-4 に修正後の解析結果と示す．

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ポストピークにおいては，修正手順 1 を行うことで実験結果とほぼ同様の勾配で CMOD の増加に伴い緩やかに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 0.5mm，浸漬期間を 0month および初期ひび割れ幅を 1.0mm，浸漬期間を 0, 3, 6months とした場合においては修正手順 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 CMOD

が 5mm 付近まで出力された．特に初期ひび割れ幅を 0.5 および 1.0mm，浸漬期間 0month とした場合においては，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．

プレピークに着目すると，初期ひび割れを 0.0mm 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 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形となる．一方で，初期ひび割れ幅を 0.1mm 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が確認できる．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．

4. まとめ

本論文ではひび割れ幅および浸漬期間によって決定される既報の引張軟化モデルについて修正処理を施した．新たに構築したモデルを用いることで，UFC 梁の一点集中曲げ載荷試験の結果を数値解析的に良好に再現することができた．今後，UFC 部材の耐久性に関わる長期的な挙動を推定するために，UFC のひび割れおよび鋼繊維の腐食環境下における検討を進める予定である．

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) 田中良弘，福浦尚之，鶴沢哲史，坂本淳，前堀伸平，片桐誠：超高強度繊維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化，土木学会論文集，No.788/V-67，pp.159-173，2005
- 3) 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
- 4) 日本コンクリート工学協会：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
- 5) 引張軟化曲線多直線近似解析プログラム，内田裕市，日本コンクリート工学会ホームページ，http://www.jci-net.or.jp/jjci/study/jci_standard/kitsutaka_dl.html
- 6) 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