

論文 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モデル

上松瀬 慈*1・横田 弘*2・橋本 勝文*3・河野 克哉*4

要旨: 本論文では、ひび割れを導入した超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を海水浸漬し、曲げ試験から同定される引張軟化曲線を把握することにより、供試体内部の鋼繊維の腐食を考慮した UFC の引張軟化挙動モデルを提案することを目的とした。その結果、供試体内部の鋼繊維の腐食が力学特性値に及ぼす影響を定量的に評価することができた。また、UFC の引張軟化特性について、ひび割れと腐食を考慮した引張軟化モデルを新たに提案するに至った。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 鋼繊維, 腐食, 引張軟化曲線, ひび割れ幅, 初期結合応力

1. はじめに

引張脆弱性をもつコンクリート材料に対し、高強度の短繊維を混入し、高い強度、耐久性、じん性、流動性を実現させた超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) に関する研究開発が広く推し進められている。構造部材に適用される UFC は、部材断面の薄肉化、使用材料の削減および長期耐久性の向上によるライフサイクルコストの低減等多くの合理化が図れる建設材料として期待されている。

鋼繊維を用いた UFC の適用範囲を広げるためには、海洋環境のような塩分濃度の高い環境においても高い耐久性を有することが重要である。これに関して、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²⁾。しかしながら、今後供用期間中にひび割れが発生する場合や、海洋環境などの高塩分環境下での供用が想定される場合、鋼繊維の腐食により UFC に期待される高耐力、高じん性が担保できない可能性がある。さらに、部材の表面近傍に発生する多くの点錆や錆汁によって美観を損ねることが懸念される³⁾。

現行の設計・施工指針¹⁾によると、UFC に発生する引張応力がひび割れ発生強度を超えないように設計されている。すなわち、UFC はひび割れの発生を許容しない部材として取り扱われている。しかしながら、UFC はひび割れ発生後においても鋼繊維の架橋効果および引抜き抵抗性により高いじん性と引張力を十分に負担できる優れた力学特性を有しているとされている。そのため、ひび割れおよび鋼繊維の腐食発生後の UFC の力学特性を適切に評価することで、構造部材としての適用範囲を

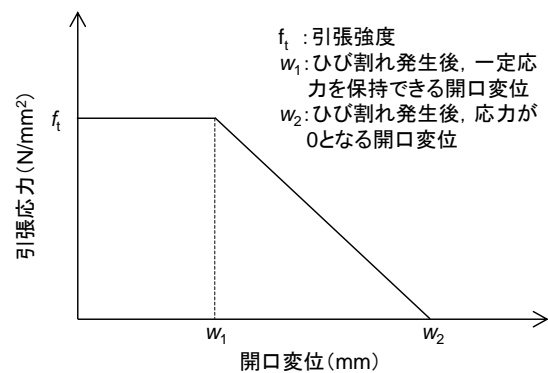


図-1 引張軟化曲線モデル

広げることが可能になると考えられる。

UFC が高い強度を有していることと、ひび割れ発生以降に高いじん性を示す引張特性は構造物の破壊挙動に対して重要な役割を果たしている。このとき、UFC を用いた構造物の照査に用いられる簡易的な引張軟化モデル (図-1 参照) が一般的に知られている⁴⁾。本モデルにおいては、引張強度 f_t を保持する領域と線形的に応力が低下する領域から構成されるが、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の発生と鋼繊維の腐食を考慮する必要があると考えられる。

本論文では、供試体内部における鋼繊維の腐食の進行とその影響を顕著に表すため、通常の高強度コンクリートに加えて水結合材比を変化させた鋼繊維補強コンクリートも同時に作製し、海水浸漬試験後の曲げ試験結果から算出した力学特性値を基に、ひび割れの発生および鋼繊維の腐食が引張軟化挙動に与える影響を明らかにすることを目的とした。

*1 北海道大学 工学部環境社会工学科 (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 太平洋セメント株式会社中央研究所 複合構造物材料チーム 主任研究員 博士 (工) (正会員)

表-1 配合及びフロー表

W/B	単位量(kg/m ³)						配合条件(Vol.%)			90秒フロー(mm)
	W	LC	SF	S	F	SP	W/(LC+SF)	SF/(LC+SF)	F混入量	
13%	180	1146	214	927	157	24	40	80	2	281×272
32%	313	805	150	927	157	3	100	80	2	109×110
52%	385	619	115	927	157	0	160	80	2	105×103

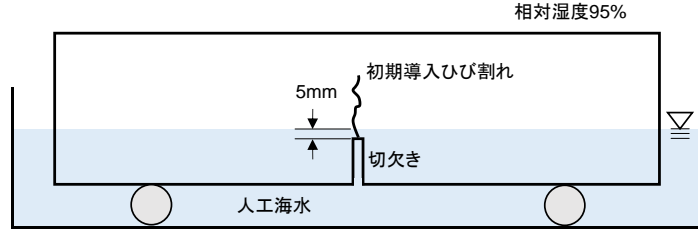


図-2 海水浸漬試験の概要

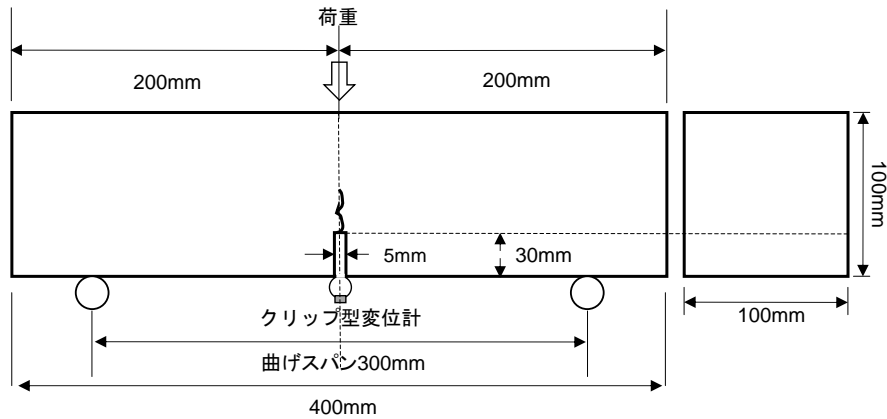


図-3 供試体および曲げ試験の概要

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは低熱ポルトランドセメント（LC， $\rho=3.22\text{g/cm}^3$ ）とし、混和材にはシリカフューム（SF，BET比表面積 $=10\text{m}^2/\text{g}$ ， $\rho=2.40\text{g/cm}^3$ ），細骨材には珪砂（S， $\rho=2.61\text{g/cm}^3$ ）を使用した。補強繊維には鋼繊維（F，直径 0.2mm ×長さ 15mm ， $\rho=7.84\text{g/cm}^3$ ）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に配合およびフレッシュ性状としてフロー値を示す。なお、配合条件は Furnas の最密充填理論による簡易計算⁵⁾に基づき粉体構成（LC：SF=8：2（体積比））を決定した。

2.2 供試体の作製方法

100×100×400mmの角柱供試体を JCI-S-001-2003「切欠きはりをを用いた繊維コンクリートの荷重・変位曲線試験方法」に準拠して作製した。打設から24時間後に脱型し、室温 20°C ，相対湿度95%の恒温恒湿室にて24時間静置した。その後、蒸気養生槽にて昇温速度 15°C/hr で最高気温 90°C まで昇温し、最高温度を48時間保持した後、降温速度 15°C/hr にて 20°C まで降温した。熱養生終了後の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。

2.3 初期ひび割れの導入

除荷後の残留ひび割れ幅が目標のひび割れ幅である1.0mmとなるように初期ひび割れの導入を行った。既往の研究結果⁶⁾のうち、初期導入ひび割れ幅1.0mmにおいて実験データの変動が顕著に表れたため、本研究においてはこの場合を用いて検討を行った。その結果、残留ひび割れ幅は1.0mmから1.2mmとなり、このひび割れ幅が海水暴露中も維持されていることを確認した。

2.4 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12カ月とし、浸漬期間中、人工海水は1カ月に1回の頻度で全量交換した。12カ月の浸漬期間終了後には、目視により切欠き開口部の鋼繊維の腐食および供試体表面の点錆の発生を確認した。

2.5 曲げ試験

海水浸漬を行わない場合は初期ひび割れの導入直後に、また海水浸漬を行う場合は浸漬終了後に曲げ試験を行った。図-3に供試体および曲げ試験の概要を示す。スパン300mmで万能材料試験器を用いて一点集中荷重を

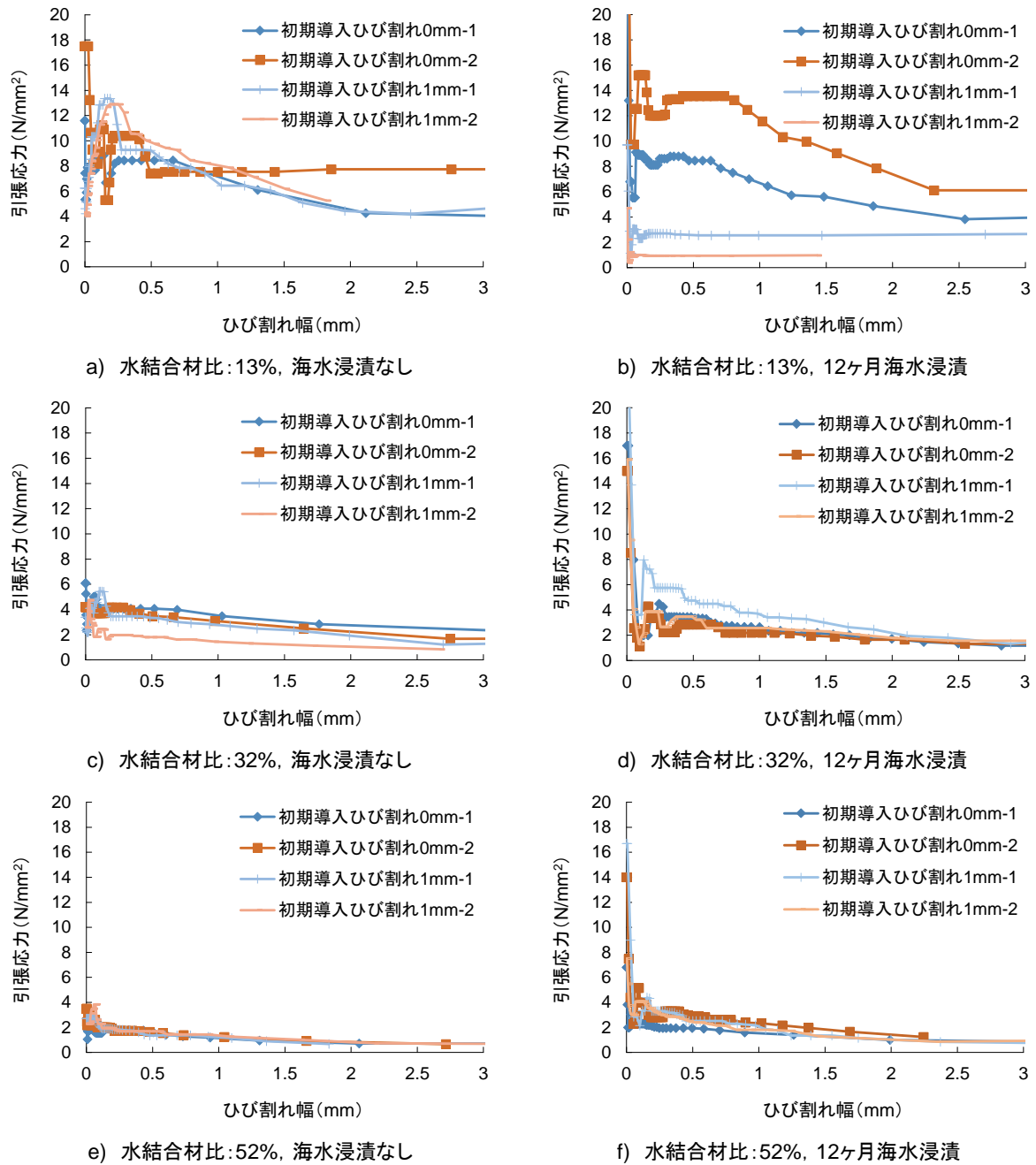


図-4 引張軟化曲線

静的に荷重し、ひび割れ肩口開口変位（以下、CMOD）を測定した。なお、CMODは切欠き肩口にナイフエッジを取り付けることにより、その水平変位をクリップ型変位計により測定した。同時に、荷重点変位を測定した。得られた荷重-CMOD曲線を用いて引張軟化曲線を同定した。

2.6 力学特性値

得られた引張軟化曲線に基づき、ひび割れ幅が0mmでの最大引張応力を初期結合応力とした。本研究では、すでにひび割れを導入した供試体についても、最終的に曲

げ試験の結果から得られる引張軟化曲線に対して、ひび割れ幅が0mmとなるときに引張応力をひび割れを有する供試体の初期結合応力とした。上述の荷重-CMOD曲線に基づきJCI-001-2003に準じて式(1)にて破壊エネルギー G_f を算出した。

$$G_f = (0.75w_0 + w_1) / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、

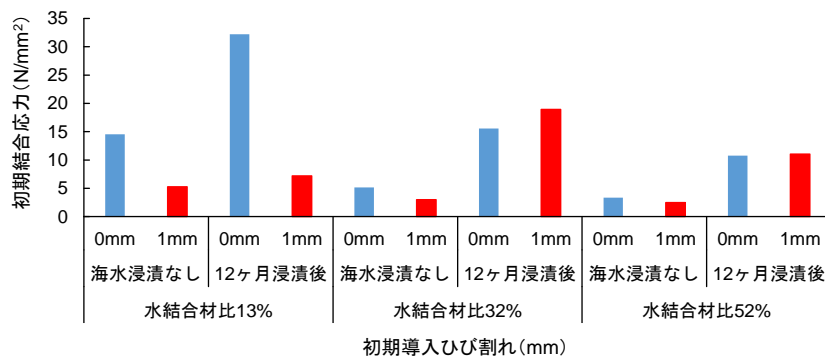


図-5 初期結合応力

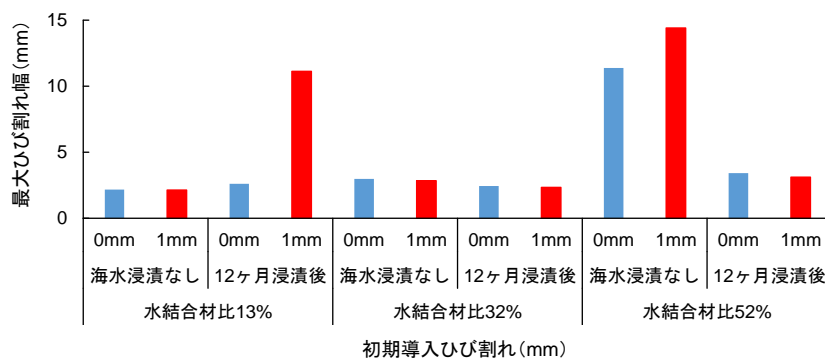


図-6 最大ひび割れ幅

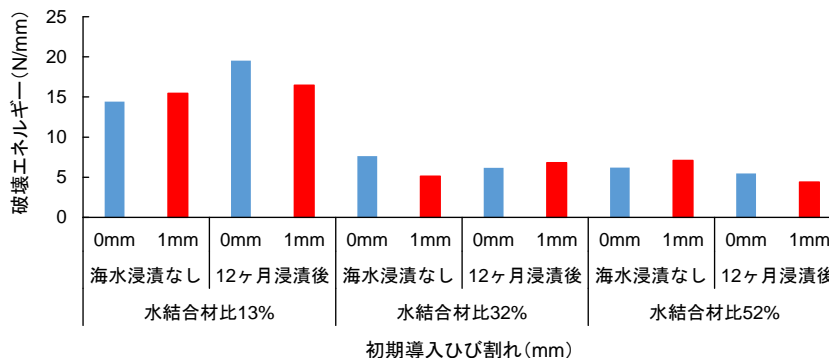


図-7 破壊エネルギー

w_0 : 荷重-CMOD 曲線下の面積 ($N \cdot mm$)

w_1 : 供試体の自重ならびに載荷治具が成す仕事 ($N \cdot mm$)

A_{lig} : リガメントの面積 ($=7000mm^2$)

引張軟化モデルにおける最大ひび割れ幅を決定するために、得られた引張軟化曲線の最終要素点から引張応力が $0N/mm^2$ になるまでは線形的に減少すると仮定し、終点までの積分値と荷重-CMOD 曲線から算出した破壊エネルギーが一致する点を最大ひび割れ幅とした。

3. 引張軟化曲線に基づく力学特性値の評価

得られた全ての引張軟化曲線を図-4 に示す。圧縮強度が $200MPa$ を超えて、超高強度繊維補強コンクリートと

呼べるのは水結合材比 13% の場合だけであることを確認した⁷⁾。したがって、以降では、水結合材比 13% のものを UFC と称する。

水結合材比 13% では、ひび割れを導入した上で海水浸漬を行った場合にひび割れ近傍の鋼繊維は腐食していた。一方、水結合材比 32% および 52% では、海水浸漬を行った場合にひび割れ導入の有無にかかわらず鋼繊維の腐食を確認した。

3.1 初期結合応力

引張軟化曲線から読み取ることのできる初期結合応力を図-5 に示す。UFC (水結合材比 13%) では、ひび割れ幅の増加に伴い初期結合応力が低下し、浸漬期間の増

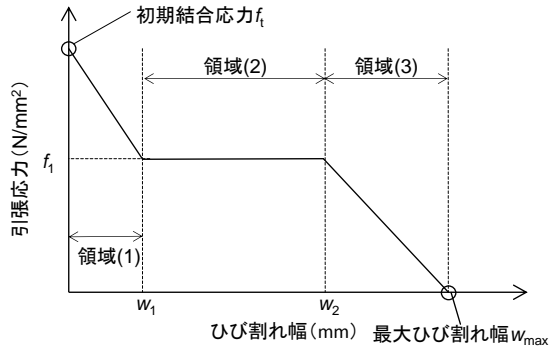


図-8 腐食を考慮した UFC の引張軟化モデル

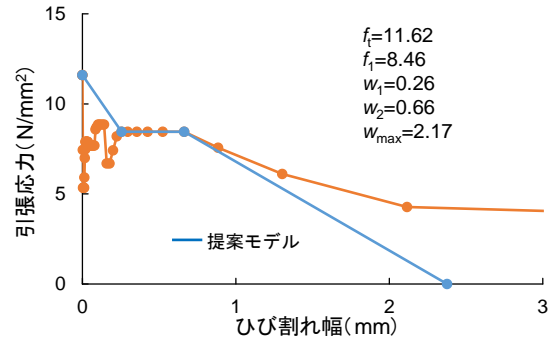
加に伴い初期結合応力が増加した。水結合材比 32%および 52%では、海水浸漬による鋼繊維の腐食に伴い初期結合応力が増加した。このことから、本論文で設定した水結合材比、初期導入ひび割れ幅および浸漬期間の範囲内では、UFC においてはひび割れによる鋼繊維の腐食により初期結合応力は低下することがわかった。一方、水結合材比 32%および 52%では、塩化物イオンの浸入による腐食および水分の浸透による未水和セメントの水和が促進されたものと考えられる。その結果セメントマトリクスと鋼繊維の付着特性が向上したことにより、初期結合応力が増加したと推察される。

3.2 最大ひび割れ幅

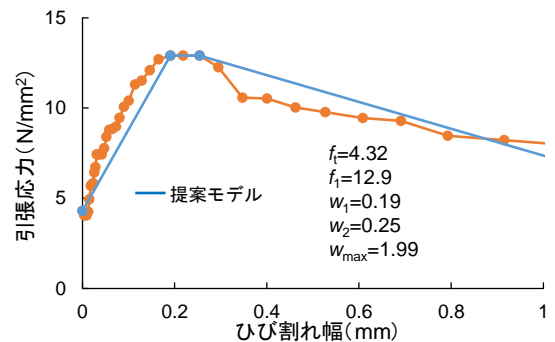
引張軟化曲線から決定した最大ひび割れ幅を図-6 に示す。UFC (水結合材比 13%) では、ひび割れによる鋼繊維の腐食に伴い最大ひび割れ幅が増加した。水結合材比 32%では、最大ひび割れ幅の変化は見られなかった。水結合材比 52%では、海水浸漬による鋼繊維の腐食に伴い最大ひび割れ幅が低下しており、上述した初期結合応力の増減に対して、最大ひび割れ幅の増減は異なる傾向を示した。本論文で設定した水結合材比、初期導入ひび割れ幅および浸漬期間の範囲内では、UFC においてはひび割れによる鋼繊維の腐食により最大ひび割れ幅は増加することがわかった。このとき、セメントマトリクス内部の鋼繊維については腐食が進行していないと言える。一方で、水結合材比の高い供試体においては、鋼繊維の腐食が進行したことによって、ひび割れ内部での鋼繊維の破断あるいはセメントマトリクス内部での鋼繊維との付着特性の低下により、部材のじん性が失われていくことで、結果として最大ひび割れ幅が低下したと考えられる。

3.3 破壊エネルギー

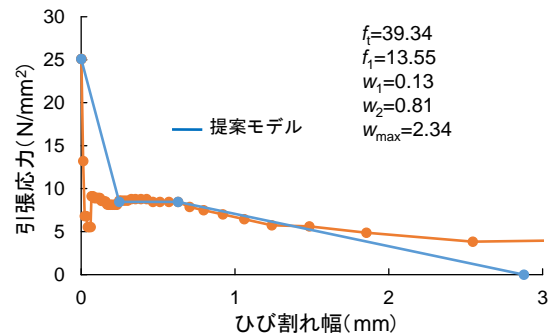
荷重-CMOD 曲線から算出した破壊エネルギーを図-7 に示す。水結合材比に関わらず、ひび割れおよび浸漬期間による破壊エネルギーの変化はみられなかった。上述のように、UFC では初期結合応力の低下と最大ひび割



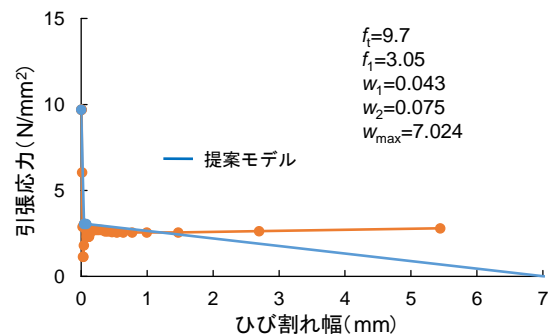
a) 海水浸漬なし、初期導入ひび割れ 0mm



b) 海水浸漬なし、初期導入ひび割れ 1mm



c) 12ヶ月海水浸漬、初期導入ひび割れ 0mm



d) 12ヶ月海水浸漬、初期導入ひび割れ 1mm

図-9 引張軟化モデル

れ幅の増加が起こり、水結合材比が 32%および 52%では初期結合応力の増加と最大ひび割れ幅の減少が起こり、

破壊エネルギーは一定を保つ結果となった。

4. ひび割れおよび腐食の発生を考慮した引張軟化モデルの提案

ひび割れの導入および海水浸漬試験の結果、上記で得られた UFC の力学特性値に基づいて、引張軟化曲線のモデル化を行った。本論文が提案する引張軟化モデルは、セメントマトリクスのひび割れ発生直後に応力が変化する領域（領域(1)）、鋼繊維の架橋効果で引張応力を保持する領域（領域(2)）、開口変位の増加に伴い応力が徐々に低下する領域（領域(3)）の3つから構成される。（図-8 参照）

モデル中の各パラメータのうち、 f_i および w_{max} は初期結合応力と最大ひび割れ幅を示している。 f_i はひび割れ幅の増加とともに応力が一定の値を保持している領域の引張応力とした。この領域の始点と終点のひび割れ幅を w_1 および w_2 とした。モデル中の各パラメータ f_i 、 w_1 および w_2 の設定は、まず、逆解析結果において引張応力がほぼ線形的に低下し始めるひび割れ幅を w_2 と定め、 w_2 における引張応力を f_i とした。次に、初期結合応力以降に引張応力が f_i に収束し始めるひび割れ幅を目視で選定し、これを w_1 と定めた。全ての実験水準および解析結果において、妥当な値を判断できた。なお、これら全ての点を結ぶ線で囲まれる面積が荷重-CMOD 曲線から算出した破壊エネルギーと等しくなることを確認している。

図-9 に実験結果から同定した引張軟化曲線と本論文の提案モデルを示す。これより、UFC の有する引張軟化挙動を忠実に再現するためには、本研究で提案するモデルが示すように、ひび割れ直後の応力変化が生じる領域についても表現するのがより適切であることがわかる。特に、既往の文献⁴⁾では図-1 において $w_1=0.5\text{mm}$ 、 $w_2=4.3\text{mm}$ とされているが、UFC に発生するひび割れと鋼繊維の腐食を考慮した場合には、これらの値に特定できないことを提案する引張軟化モデルは示すことができる。このように、本提案モデルは今後の高精度化によって UFC の引張軟化挙動を精密かつ単純に表現できる可能性を有している。

一方で、本提案モデルの高精度化のためには、同様の試験を多くの試験水準（例えば、初期導入ひび割れ幅や浸漬期間など）において実施する必要がある。さらに、各パラメータの定式化および FEM 解析への適用により、本提案モデルの妥当性を検証することが今後の課題である。

5. まとめ

超高強度繊維補強コンクリートにおける鋼繊維の腐食と引張軟化挙動の関係を確認した結果、ひび割れによる鋼繊維の腐食が進行した場合には、初期結合応力は減少する一方で最大ひび割れ幅は増加し、破壊エネルギーについては変化がみられなかった。また、本論文で得られた結果を用いて提案した引張軟化モデルは、ひび割れおよび腐食の発生を考慮した実際の引張軟化挙動を的確に表現できることを確認できた。今後、FEM 解析への適用により、精度を確認する必要がある。

謝辞

本論文に係る実験の遂行に際し、太平洋セメント株式会社中央研究所複合構造材料チーム川口哲夫氏、北海道大学大学院工学院の豊田昂史氏に多大なるご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

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) 兵頭彦次，新藤竹文，横田弘，下村匠：超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透性と鋼繊維の腐食に関する実験的検討，土木学会第59回年次学術講演概要集，第V部門，pp.1009-1010，2004
- 3) 田中敏嗣，新藤竹文，横田弘，下村匠：超高強度繊維補強コンクリート中における鋼繊維の腐食に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.267-272，2004
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 橋本勝文，横田弘，豊田昂史，河野克哉：ひび割れを有する超高強度繊維補強コンクリートの海水浸漬後の引張軟化特性およびひび割れ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.1，pp.220-225，2012
- 7) 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