

論文 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

橋本 勝文*1・横田 弘*2・豊田 昂史*3・河野 克哉*4

要旨: 本論文では、ひび割れを有する超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を海水浸漬し、ひび割れ性状と引張軟化特性を把握することにより、ひび割れ発生後に UFC が保有する性能を確認することを目的とした。その結果、0.5mm の初期導入ひび割れ幅を閾値として、海水浸漬がひび割れを有する UFC の最大耐力に影響を及ぼすことが確認された。また、初期導入ひび割れ幅が 0.5mm より大きい場合でも、海水浸漬前と比較して海水浸漬後の引張軟化曲線で示される UFC の鋼繊維の架橋効果による応力負担が増大することが確認された。

キーワード: 高強度コンクリート, 鋼繊維, 引張軟化曲線, ひび割れ幅, ひび割れ深さ

1. はじめに

コンクリート材料が従来持つ引張脆弱性に対し、繊維補強を施すことにより、高じん性、高強度、高耐久性を付与し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。高強度と高耐久性を有する UFC の適用は部材の大幅な薄肉軽量化を実現することが可能となるため、構造材料としての高い性能が期待されている。このとき、補強用繊維には、引張強度 $2 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 以上で、直径 0.1~0.25mm および長さ 10~20mm の繊維を使用し、2vol.%以上混入したものが標準とされている¹⁾。

一般に、UFC の補強用繊維には鋼繊維を使用することが多い。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における高耐久性を有することが重要である。これに関して、UFC の塩化物イオンの見掛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、極めて高い塩化物イオン浸透抵抗性を有することが報告されている²⁾。しかしながら、海洋環境等の高塩分環境での供用が想定される場合、鋼繊維の腐食により、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、部材表面近傍の点錆あるいは錆汁が多く発生し、美観を損ねることが懸念される³⁾。

UFC の水結合材比は 0.24 以下¹⁾とするのが標準とされているが、低水粉体比の膨張コンクリートにおいては、水分の供給により部材のひび割れが閉塞する現象に着目した自己修復・自己治癒する機能開発に関する研究がなされている⁴⁾。また、曲げひび割れを受けたコンクリートの水中養生による自己治癒能力を荷重-変位曲線の観察により明らかにしている⁵⁾。海洋環境への曝露を想定した場合、UFC についても発生する微細なひび割れへ

の海水成分の浸透により、残存する未水和セメントの再水和に伴うひび割れの閉塞あるいは性能の回復が予想される。

UFC は本来、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引張力を十分に負担できる優れた力学特性を有した複合材料である。しかしながら、土木学会では、UFC に発生する引張応力がひび割れ発生強度を超えないことが原則とされている¹⁾のが現状であり、ひび割れ発生後の UFC の耐久性は不明確な点が多い。本論文では、ひび割れを有する UFC を海水浸漬し、一定の浸漬期間後のひび割れ性状と引張軟化特性を把握する。これにより、ひび割れ発生後に UFC が保有する性能を確認することを目的とした。

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ェューム(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 $0.2 \text{mm} \times$ 長さ 15mm , $\rho=7.84 \text{g/cm}^3$)を使用した。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 Furnace の最密充填理論による簡易計算⁶⁾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。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

*1 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)

*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 工学院北方圏環境政策工学専攻 (非会員)

*4 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 主任研究員 博士(工) (正会員)

表-1 配合およびフロー値

配合条件			単体量						フロー	
W/(LC+SF)	SF/(LC+SF)	F 混入率	W	LC	SF	S	F	SP	90sec	200mm 到達
(Vol.%)	(Vol.%)	(Vol.%)	(kg/m ³)	(mm)	時間(sec)					
40	80	2.0	180	1146	214	927	157	24	281×272	10.01

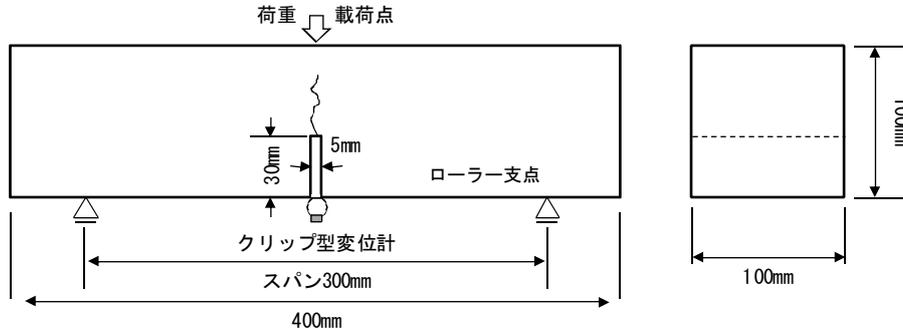


図-1 供試体および曲げ試験の概要

表-2 UFG 供試体の力学特性

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー (N/mm)
210.1	59.5	10.5	14.4

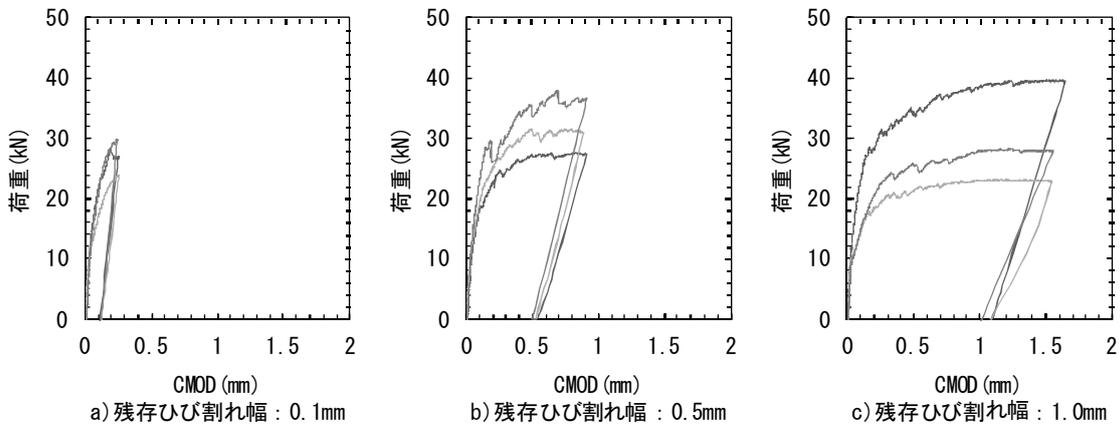


図-2 初期ひび割れ導入時の荷重-CMOD 曲線

さ 30mm の切欠きを導入した。打設から 24 時間後に脱型し、室温 20℃、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℃/hr で最高温度 90℃まで昇温し、最高温度を 48 時間保持した後、降温速度 15℃/hr にて 20℃まで降温した。

2.3 曲げ試験

初期ひび割れの導入および導入直後と後述の海水浸漬試験終了後に曲げ試験を行った。図-1 に供試体および曲げ試験の概要を示す。スパン 300mm で万能材料試験機を用いて静的一点荷重しながら荷重およびひび割れ肩口開口変位(以下、CMOD)を測定した。なお、

表-3 初期ひび割れ幅の目標値および実測値

目標値(mm)	実測値(mm)		
0.1	0.082	0.094	0.091
0.5	0.413	0.496	0.515
1.0	1.097	1.048	1.094

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(LPD)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⁷⁾。また、実際には差異があると考えられるが、初期ひび割れ導入

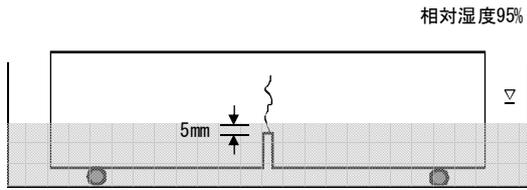


図-3 供試体の海水浸漬試験

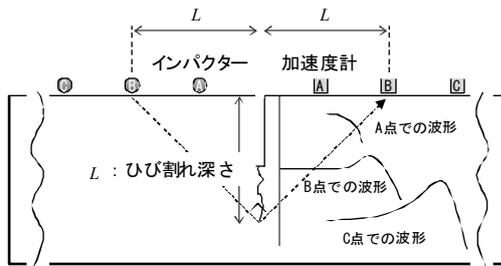


図-4 ひび割れ深さの測定概要

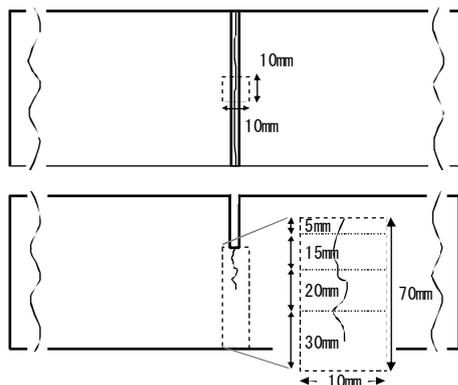


図-5 粉末 X 線回折による分析範囲

時の肩口開口変位の残留変位のことを初期ひび割れ幅とした。

表-2 に本研究で用いた UFC 供試体の力学特性を示す。なお、求めた荷重-CMOD 曲線に基づき JCI-S-001-2003 に準じて式(1)にて破壊エネルギー G_f を算出した。

$$G_f = (0.75W_0 + W_l) / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、

W_0 : 荷重-CMOD 曲線下の面積(N・mm)

W_l : 供試体の自重ならびに載荷治具が成す仕事(N・mm)

A_{lig} : リガメントの面積(=7000mm²)

本論文では除荷後の残存ひび割れ幅が目標のひび割れ幅となるように初期ひび割れの導入を行った。なお、残存ひび割れ幅が 0(ひび割れ無), 0.1, 0.5, 1.0mm となるよう目標の初期ひび割れ幅として 3 水準設定した。図-2 に同一条件で行った供試体(n=3)の初期ひび割れ導入時の荷重-CMOD 曲線を示す。なお、実際には表-3 に示

す残存ひび割れ幅になったことを確認した。このうち、目標の初期ひび割れ幅に近い 2 体(n=2)を海水浸漬用の試験体とした。

2.4 海水浸漬試験

図-3 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。人工海水には結晶性粉末の混合品を使用した。切欠き端部から 5mm の高さまで供試体を浸漬し、ひび割れへの海水成分の浸透を模擬した。なお、浸漬期間は 3 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。3 カ月の浸漬期間終了後、目視により切欠き開口部の鋼繊維の僅かな腐食および供試体表面の点錆の発生を確認した。鋼繊維の腐食状況の顕微鏡による観察結果に関して、ひび割れ幅が大きく、海水浸漬部あるいは水面付近の鋼繊維には腐食生成物の析出が認められた。

2.5 ひび割れ深さの測定

海水浸漬前後に弾性波法(直角回折法、図-4 参照)を用いてひび割れ深さを測定した。切欠きおよびひび割れを挟んで等距離にインパクターと受信機をセットし、インパクターから発生させた衝撃が受信する弾性波の初期波形からひび割れ深さを同定した。すなわち、ひび割れ先端を迂回してくる初期波形が、下向きの波形(引張り波、図中 A)から、上向きの波形(圧縮波、図中 B)に変わる位置がひび割れ深さを示す。ここで、測定されるひび割れ深さには供試体作製時に導入した切欠き深さが含まれるため、ひび割れ深さの測定結果が 30mm となる場合、供試体に存在するひび割れ深さは 0mm であると理解できる。

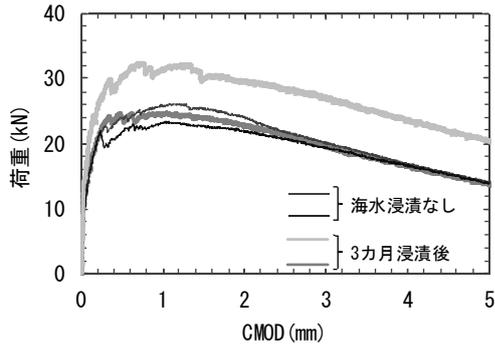
2.6 セメント水和生成物の定性分析

熱養生および海水浸漬後に粉末 X 線回折によりエトリンライト(2θ=9.1°)およびモノサルフェート(2θ=9.9°)の定性分析を行った。測定条件は、ステップ幅を 0.02°, スキャンスピードを 2°/min とした。なお、図-5 に分析領域を示す。ひび割れの進展方向に切欠き端部からの距離が 5, 20, 40, 70mm, ひび割れの開口方向に 10mm および供試体中心部から 10mm となる各領域について粉末 X 線回折ピークを得た。なお、105μm 以下となるよう粉末試料を作製する際に、鋼繊維は取除いた。

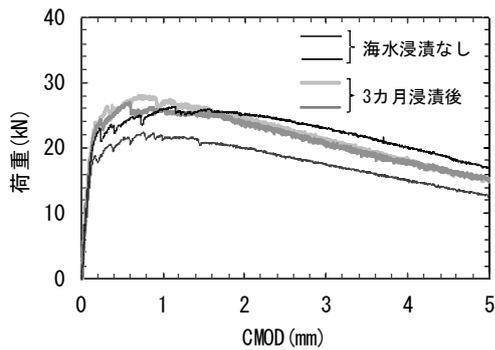
3. 実験結果

3.1 荷重-CMOD 曲線

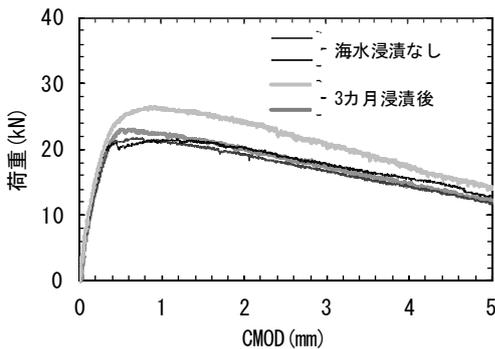
図-6 に初期ひび割れ導入直後(海水浸漬なし, n=2)および 3 カ月の海水浸漬試験終了後(n=2)の供試体で実施した荷重-CMOD 曲線を示す。これより、初期導入ひび割れ幅を 0(無), 0.1 および 0.5mm とした場合、ピーク荷重は海水浸漬の影響を受けても変化がない、あるいは僅かに増加する傾向が確認された。このことから、一般に



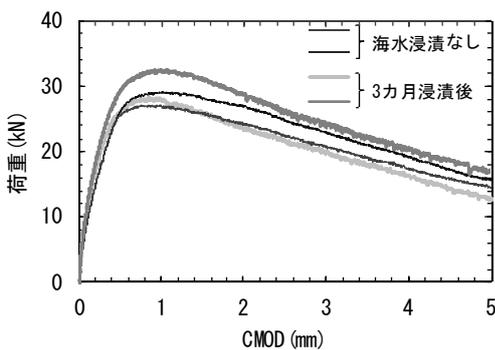
a) 初期導入ひび割れ無



b) 初期導入ひび割れ幅 : 0.1mm



c) 初期導入ひび割れ幅 : 0.5mm



d) 初期導入ひび割れ幅 : 1.0mm

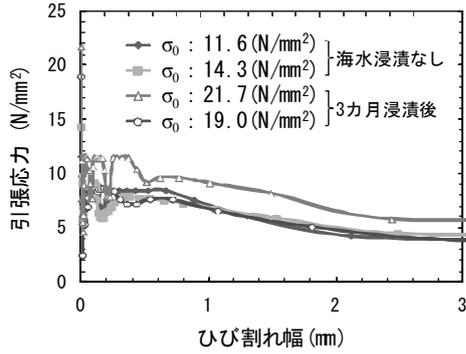
図-6 荷重-CMOD 曲線

鉄筋腐食によりコンクリートとの付着性能が一時的に向上することと同様に、鋼繊維が腐食した場合も UFC のマトリクスと鋼繊維の付着性能が向上し、ピーク荷重の増加に寄与している可能性がある。一方で、初期導入ひび割れ幅を 1.0mm とした場合、ピーク荷重は海水浸漬

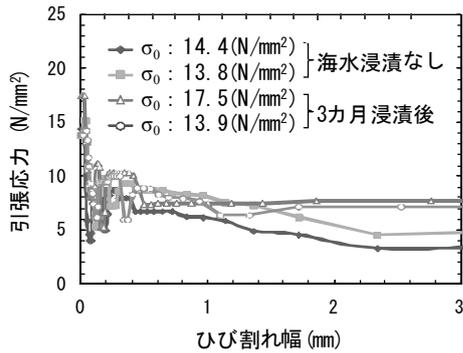
の影響を受けても変化がない、あるいは僅かに減少する傾向が確認された。また、初期導入ひび割れ幅を 0(無)および 0.1mm とした場合、海水浸漬試験終了後にもピーク荷重付近において荷重が最大値を維持しながら増加と減少を繰り返す現象が見られることから、鋼繊維が高い付着性とともにつき抜かれる架橋効果を発揮し、3カ月の海水浸漬試験終了後も UFC のマトリクスと鋼繊維の付着性能を維持していると考えられた。しかしながら、初期導入ひび割れ幅を 0.5 および 1.0mm とした場合、海水浸漬試験終了後にはピーク荷重付近において荷重が増加と減少を繰り返す現象が見られず、単調にピーク荷重を迎え、荷重が緩やかに低下していくことから、上記の鋼繊維の付着性能が変化している可能性が推察された。既往の研究⁸⁾では、ひび割れ幅が 0.1mm 以上になる場合に鋼繊維の腐食発生が顕著になることが示されているが、本研究では、0.5mm の初期導入ひび割れ幅を閾値として、海水浸漬がひび割れを有する UFC の最大耐力ならびに鋼繊維の付着特性に影響を及ぼすことが確認された。なお、初期導入ひび割れ幅の大小に関わらず、初期剛性(荷重-CMOD 曲線の初期勾配)は海水浸漬の影響を受けていないことがわかった。以上の曲げ試験終了後、破断面の目視観察を行ったところ、鋼繊維の破断は認められなかった。

3.2 引張軟化曲線

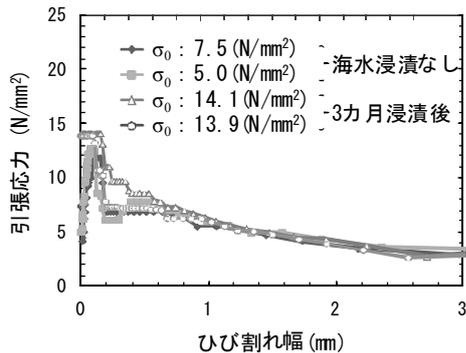
図-6 に示した荷重-CMOD 曲線を用いて同定した引張軟化曲線を図-7 に示す。なお、ひび割れ幅が 0 となる時の引張応力(y 切片)を初期結合応力 σ_0 として図中に示す。これより、初期導入ひび割れ幅に関わらず、海水浸漬なしの場合と比較して、3 カ月浸漬試験終了後の場合に初期結合応力が増加している。図-8 に示すように、UFC の引張軟化曲線により示される引張軟化挙動は、マトリクスのひび割れ発生直後に応力が低下する領域(領域①)、鋼繊維の架橋効果で再度応力が増加する領域(領域②)、開口変位の増大に伴い応力が徐々に低下する領域(領域③)の 3 つに分けることができる¹⁾。これに基づき、図-7 に示される引張軟化挙動について、初期導入ひび割れ幅を 0(無)および 0.1 とした場合、初期結合応力から応力が低下するが、初期導入ひび割れ幅を 0.5mm とした場合、初期結合応力から応力が低下せず最大応力を保持していることが確認された。一方で、初期導入ひび割れ幅を 1.0mm とした場合、初期結合応力から応力が低下していることが確認された(領域①)。その後、初期導入ひび割れ幅に関わらず、鋼繊維の架橋効果で 3カ月の海水浸漬後には海水浸漬前よりも高い引張応力を負担していた(領域②)。さらに、開口変位の増大後も海水浸漬前と同等かそれ以上の応力を負担しており、初期導入ひび割れ幅が 0.5mm より大きい場合、最大応力の負担領域が増大



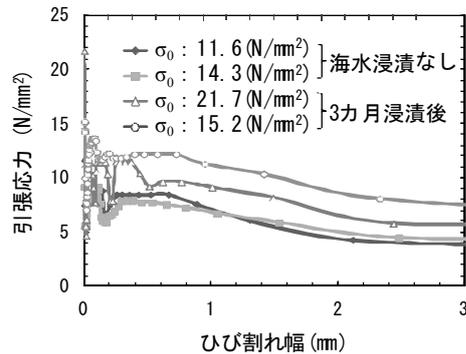
a) 初期導入ひび割れ無



b) 初期導入ひび割れ幅 : 0.1mm



c) 初期導入ひび割れ幅 : 0.5mm



d) 初期導入ひび割れ幅 : 1.0mm

図-7 引張軟化曲線

する傾向が認められた(領域③)。以上の結果は、荷重-CMOD 曲線の結果と同様に、上述の鋼繊維の腐食による付着性能の向上に起因すると考えられる。しかしながら、今後、鋼繊維の腐食性状およびUFCのマトリクスとの付着特性について検討を進めるとともに、ひび割れを

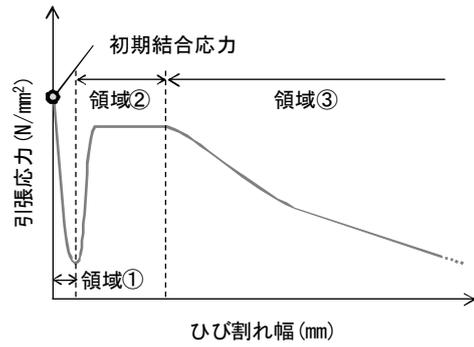
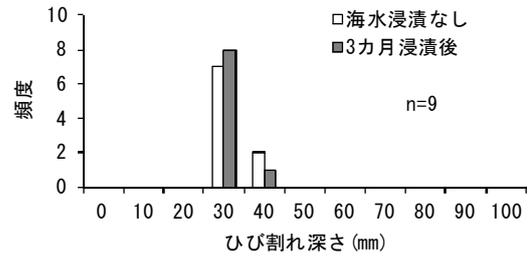
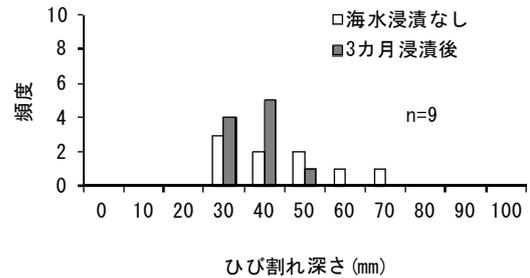


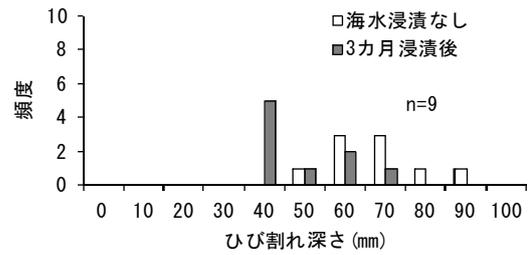
図-8 UFCの引張軟化曲線



a) 初期導入ひび割れ幅 : 0.1mm



b) 初期導入ひび割れ幅 : 0.5mm



c) 初期導入ひび割れ幅 : 1.0mm

図-9 ひび割れ深さの測定結果

有するUFCの引張軟化特性の評価を行う必要がある。

3.3 ひび割れの閉塞に関する考察

上述のように、海水浸漬前後に弾性波法ひび割れ深さを測定した。なお、初期ひび割れ導入時の曲げ試験終了後および3カ月の海水浸漬期間終了後、それぞれ1週間程度静置した後にひび割れ深さの測定を行った。

(1) ひび割れ深さ

図-9に初期ひび割れ導入時および3カ月の海水浸漬終

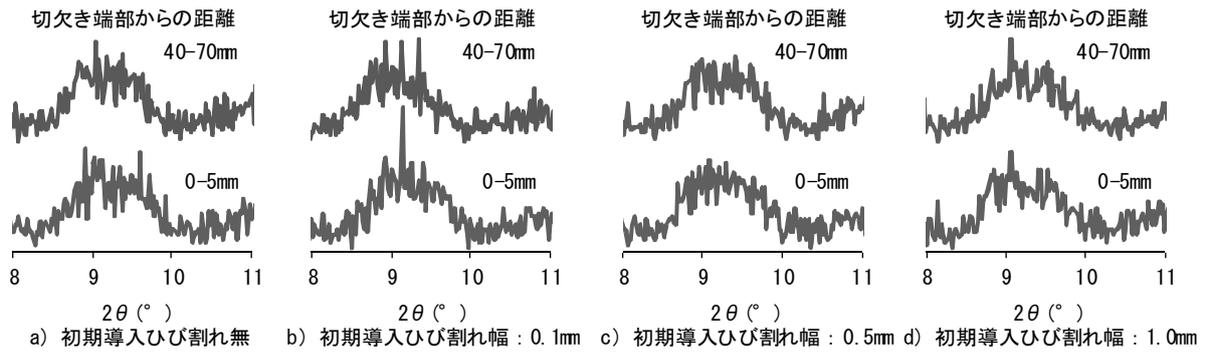


図-9 粉末 X 線回折ピーク

了後のひび割れ深さの測定結果を示す。これより、海水浸漬によりひび割れ深さが浅くなること確認された。特に、初期導入ひび割れ幅が大きいほど、測定されるひび割れ深さが浅くなること確認された。

(2) セメント水和生成物の定性分析

ここで、ひび割れ部への海水成分の浸透に伴う未水和セメントの再水和による開口部の閉塞の可能性が考えられたため、X線粉末回折によりセメント水和生成物の定性分析を行った結果を以下に示す。図-9に回折角8～11°のX線回折ピークを示す。これより、初期導入ひび割れ幅および切欠き端部からの距離に関わらず、概ね類似したX線回折ピークを得た。すなわち、ひび割れ部における再水和の進展に差異がなかったと言える。したがって、ひび割れ深さの測定結果の変化は、鋼繊維の腐食によるUFCのマトリクスとの付着性能の向上あるいは、海水浸漬期間を経たことにより同一曲げ試験条件でも曲げ試験前の応力状態が変化したものと推察される。

4. まとめ

ひび割れ発生を有するUFCが保有する性能を確認した結果、0.5mmの初期導入ひび割れ幅を閾値として、海水浸漬がひび割れを有するUFCの最大耐力に影響を及ぼすことが確認された。また、初期導入ひび割れ幅が0.5mmより大きい場合でも、海水浸漬前と比較して海水浸漬後の引張軟化曲線により示される応力負担が増大することが確認された。これに関して、海水浸漬後に測定されたひび割れ深さは減少していたものの、未水和セメントの再水和によるひび割れの閉塞ではなく、鋼繊維の腐食によるUFCのマトリクスとの付着性能の向上が海水浸漬後の最大耐力および応力負担の増加に影響を及ぼしたと推察された。上記の結果を精査するため、鋼繊維の腐食性状の詳細な情報の取得およびUFCのマトリクスとの付着特性の評価が今後の課題である。また、本研究では、ひび割れを有するUFCの引張軟化特性(曲線)の評価を既往のUFCに対する手法と同様に行った。

しかしながら、評価方法および得られた結果の判断基準については別途検討が必要である。

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生氏、森香奈子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) 下村哲雄，細田暁，岸利治：低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vo.23，No.2，pp.661-666，2001
- 5) Chuonghyun Kang，国枝稔，上田尚史，中村光：Autogenous Healing Properties of Concrete under Flexural Loading，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，Vo.10，pp.269-272，2010
- 6) 三輪茂雄：粉粒体工学，pp.140-145，1972
- 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
- 8) 河野清，納田盛資，原田辰夫：鋼繊維コンクリートのひびわれと発錆に関する検討，第34回土木学会年次学術講演概要集，第V部門，pp.139-140，1979