

初期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作用下の耐荷性能

太平洋セメント(株)	正会員	工博	○河野 克哉
(株)太平洋コンサルタント		工博	川口 哲生
北海道大学大学院		工博	橋本 勝文

Abstract : Ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) has high ductility, high strength and high durability compared to normal concrete. However, these high performance may be lost when steel fibers in UFC are corroded. The objective of this study is to experimentally investigate the fracture property of UFC with cracks in seawater. The UFC notched specimens with initial crack after seawater exposure were subjected to a three-point bending test. In the result, it was revealed that slight corrosion of steel fibers increased cohesive stress to be carried by UFC regardless of the initial crack width.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete, Crack, Corrosion, Chloride penetration

1. はじめに

圧縮強度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)は, 鋼繊維の混入で引張特性を向上させたうえ, 流動性と耐久性を兼ね備えた材料である。しかしながら, UFCにひび割れを生じた場合にはひび割れ面で架橋した鋼繊維が容易に腐食し, 伝達応力の低下を引き起こすことが懸念される。UFCの優れた特長は水結合材比の低減ならびに高温の養生で実現されるものであるが, 自己収縮が増大しやすく, 収縮変形の拘束によって初期ひび割れが発生することもある。土木学会のUFCの設計・施工指針(案)では, ひび割れ防止の観点から, i)UFCの内部に異形鉄筋を用いないこと, ii)UFCに発生する引張応力はひび割れ発生強度を超えないことが規定されている¹⁾。このため, UFCは, PC構造として適用されることが多いものの, プレストレス導入時に初期ひび割れが生じた事例もある²⁾。

このような背景の下, 本研究では初期ひび割れを有するUFCの耐久性を把握するため, 人工海水に供試体を浸漬し, 曲げ特性, ひび割れ状況およびマトリクス組成の変化について検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料, 配合, 練混ぜおよび養生

(1) 使用材料ならびに配合

表-1に示すように, 結合材(以下, B)は低熱セメント(以下, C)ならびにシリカフェーム(以下, SF)の2種類とし, ヘンシェルミキサ(粉体混合装置)にて予め混合することでプレミックス粉体として用いた。また, 細骨材には珪砂(以下, S)を, 混和剤には高性能減水剤(以下, SP)を, 補強用繊維には鋼繊維(以下, F)を使用した。表-2は配合を示したものであり, プレミックス粉体(B)はFurnaceの最密充填理論³⁾による粒子の平均径(Cの場合 $20\mu\text{m}$, SFの場合 $1.3\mu\text{m}$)と空隙率(いずれの場合も0.5)を用いた簡易計算にて体積比でC:SF=8:2となるように混合した。水結合材比は体積比で40%(質量比で13.2%)とし, 繊維混入率(以下, V_f)はUFCの体積に対して内割で2.0%とした。

(2) 練混ぜならびに養生

パン型強制ミキサ(容量100L)にB, S, 水, SPを投入して7分間練り混ぜ, Fを投入してさらに2分間練り混ぜた。UFCは所定の型枠に打ち込んで, 1次養生(封緘養生: 20°C , 24h)の後で脱型し, 2次養生(蒸気養生: 昇温速度 $15^\circ\text{C}/\text{h}$, 最高温度 90°C , 最高温度保持時間48h, 降温速度 $15^\circ\text{C}/\text{h}$)を行った。

表-1 使用材料

種類	名称	略号	物性
結合材 (B)	低熱セメント	C	比表面積 3330cm ² /g, 密度 3.22g/cm ³
	シリカフェーム	SF	比表面積 10m ² /g, 密度 2.40g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 1.2mm, 密度 2.61g/cm ³
短繊維	鋼繊維	F	直径 0.2mm, 長さ 15mm, 密度 7.85g/cm ³ , 引張強度 2.8GPa, 引張弾性率 210GPa
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 配合

W/B		SF/B	V _f	単位量 (kg/m ³)					Flow	f _c '	E _c	f _{cr}	G _F
(vl.%)	(wt.%)	(vl.%)	(vl.%)	W	C	SF	F	SP*	(mm)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm)
40	13.2	20	2	180	1146	214	157	24	277	210	59.5	10.5	14.40

* Wの一部に内割添加。 f_c' : 圧縮強度, E_c ; 弾性係数, f_{cr} : ひび割れ発生強度, G_F : 破壊エネルギー

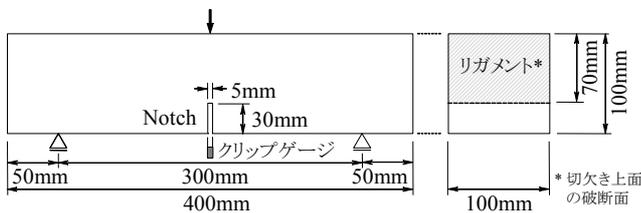


図-1 切欠きはりの三点曲げ試験の方法

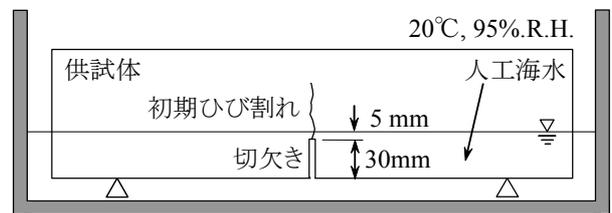


図-2 人工海水浸漬試験の方法

2.2 人工海水浸漬試験

(1) 供試体ならびに初期ひび割れの導入

供試体は図-1に示すような切欠きはり(寸法100×100×400mm)とし、蒸気養生後にカッターにて切断する形で切欠きを導入した。また、図-1に示すようにJCI-S-002-2003に準じて切欠きはりの三点曲げ試験を行うことで初期ひび割れ(以下、 w_i)を導入した。初期ひび割れ幅の目標値は、0.1mm、0.5mmおよび1.0mmの3水準とし、その実測値はすべての供試体でそれぞれ0.082~0.094mm、0.413~0.515mmおよび1.048~1.097mmの範囲となった。なお、比較として初期ひび割れを導入しない供試体も準備した。

(2) 人工海水への浸漬

初期ひび割れを導入した供試体は、図-2に示すように人工海水に浸漬した。切欠きの肩部部から5mmの深さとなるように供試体を浸漬し、ひび割れ部分への海水成分の浸透を模擬した。人工海水への浸漬期間は12ヵ月とし、試験期間中は1ヵ月に1度の頻度にて人工海水を全量交換した。また、温度20°C、相対湿度95%の環境にて浸漬試験を実施した。

(3) 荷重-開口変位曲線の測定

図-1に示したJCI-S-002-2003に準じて、所定の人工海水浸漬期間で切欠きはりの三点曲げ試験を行い、荷重-ひび割れ開口変位(以下、 $CMOD$)曲線を得た。なお、鋼繊維を混入した供試体は最終的に破壊しないため、ひび割れ発生後の最大荷重と下降域が確認できた時点($CMOD=5mm$)で試験を終了した。

(4) ひび割れからの塩化物イオン(以下、Cl⁻)浸透の観察

人工海水浸漬後の供試体のひび割れから試料(断面70×70mm、厚さ10mm)を切り出し、JSCE-G574-2005に準じて電子線マイクロアナライザー(以下、EPMA)による塩素(以下、Cl)の面分析を行った。

(5) ひび割れ深さの測定

初期ひび割れを導入した供試体は、人工海水浸漬前後で弾性波法(直角回折法)にてひび割れ深さを測定した(計9個)。切欠きとひび割れを左右にはさむ等区間にインパクトならびに加速度計(受信機)

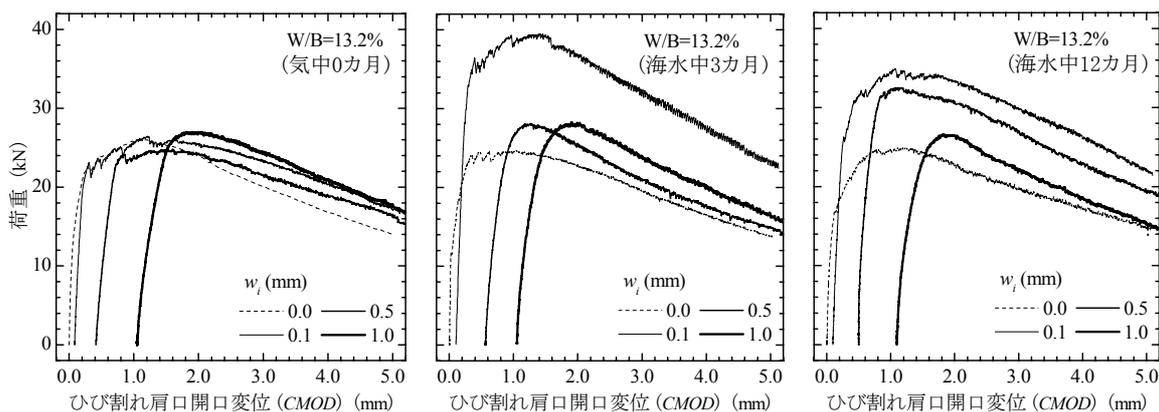


図-3 人工海水に浸漬した初期ひび割れを有するUFCの荷重-CMOD曲線の経時変化

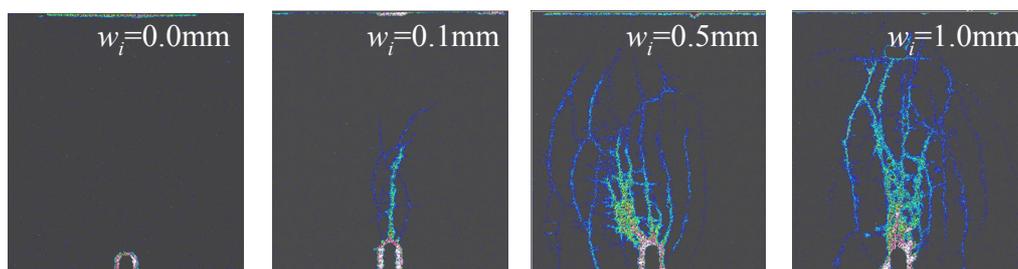


図-4 人工海水に浸漬した初期ひび割れを有するUFCのCl⁻分布のマッピング画像(12ヵ月)

を設置し、インパクトが発生した衝撃を受信した弾性波の初期波形からひび割れ深さを同定した。なお、測定されるひび割れ深さには予め設けた切欠きの深さ30mmが含まれた値となっている。

3. 実験結果

3.1 人工海水に浸漬した初期ひび割れを有するUFCの荷重-CMOD曲線

図-3は、初期ひび割れを有するUFCを人工海水に浸漬したときの荷重-CMOD曲線の経時変化を示したものである。初期ひび割れが無いUFC($w_f=0.0\text{mm}$)は人工海水への浸漬期間によって荷重-CMOD曲線がほとんど変化していないものの、初期ひび割れを有するUFC($w_f=0.1\text{mm}$, 0.5mm および 1.0mm)は浸漬期間3ヵ月ならびに12ヵ月とも人工海水への浸漬によって最大荷重が増加した。とくに初期ひび割れ幅が小さい場合($w_f=0.1\text{mm}$)に最大荷重が大幅に増加している。このことから、UFCは海洋環境下でひび割れたとしても耐荷性能が直ちに低下することはないといえる。ひび割れたUFCの荷重が海水浸漬で増加した理由は、ひび割れていないUFCの荷重が海水浸漬で変化しないことから、海水中でひび割れ面のごく近傍に埋め込まれた鋼繊維が体積膨張した腐食生成物によってマトリクスからの引き抜け抵抗が増加し、载荷初期におけるひび割れ間の結合応力が向上したことが関与したのではないかと考えている。

3.2 人工海水に浸漬した初期ひび割れを有するUFCのCl⁻浸透

図-4は、初期ひび割れを有するUFCを人工海水に12ヵ月間浸漬したときのCl⁻の浸透状況を示したものである。UFCの初期ひび割れ幅が小さい場合($w_f=0.1\text{mm}$)は卓越した1本のひび割れからCl⁻が浸入しているが、UFCの初期ひび割れ幅が大きくなった場合($w_f=0.5\text{mm}$ ならびに 1.0mm)には多数のひび割れを通じてCl⁻が浸入していることがわかる(なお、初期ひび割れ幅が大きいほどリガメント部の深い位置までCl⁻が到達している)。UFCであっても切欠きはりの載荷で実際に生じるひび割れは複数かつ微細なものとなっており、まったく1本のひび割れとして導入されておらず、切欠き肩口で計測されたひび割れ幅は実際のひび割れ幅とは異なっていることが確認できた。なお、人工海水はひび割れの毛管現象で吸い込まれたものであり、ひび割れ部分以外のUFCの緻密なマトリクス内部には拡散していないことも

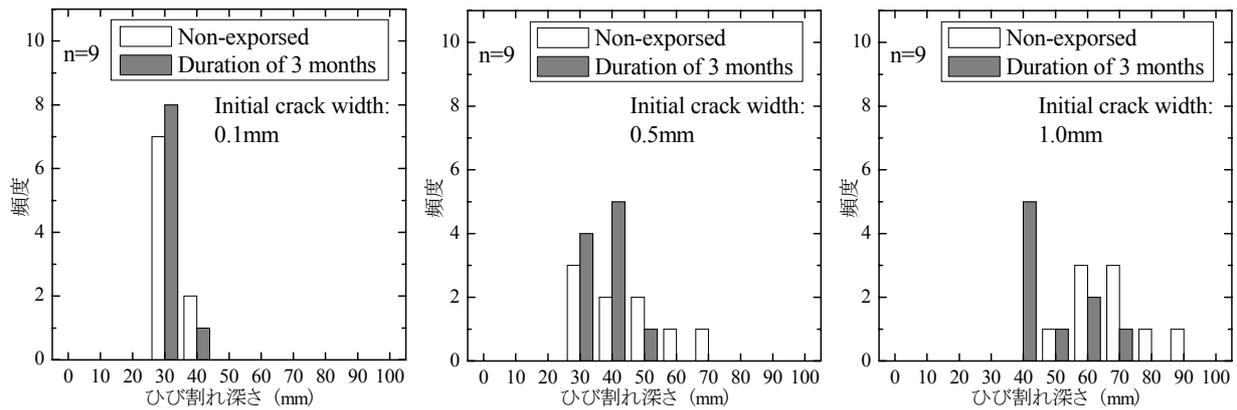


図-5 人工海水に浸漬したUFCのひび割れ深さの変化(3ヵ月)

明らかになった。また、供試体を解体してひび割れに架橋した鋼繊維を観察したところごくわずかな腐食しか生じていなかった。ひび割れが大きく開いても、実際のひび割れ幅は小さく、内部マトリクスにCl⁻浸透を生じていないことから、海水中であっても鋼繊維の腐食はあまり進んでおらず、曲げ特性を低下させなかったのではないかと考える。

3.3 人工海水に浸漬したUFCのひび割れ深さの変化

図-5は、初期ひび割れ導入時と3ヵ月間の人工海水浸漬後における切欠きはり供試体(9個)のひび割れ深さ(切欠き含む)の変化である。UFCの初期ひび割れは人工海水に浸漬することでひび割れ深さが減少している。このUFC供試体から分析試料を切り出し、SEM観察で得られた反射電子像の画像解析からUFC体積に対する未水和セメントの含有率を計算すると、 $w_f=0.0\text{mm}$ の場合41.1%、 $w_f=0.1\text{mm}$ の場合37.9%、 $w_f=0.5\text{mm}$ の場合37.6%、 $w_f=1.0\text{mm}$ の場合36.4%であった。このことより、i)UFCは豊富な未水和物を保有していること、ならびにii)ひび割れを通じて浸入した人工海水によって未水和セメントの水和を生じていることが明らかになった。このようなひび割れ部に水和物が析出する現象は、ひび割れたUFCが海水にさらされた場合でも約1年間に渡って曲げ特性が低下しないことの一因になったものと推察する。

4. まとめ

本研究では、初期ひび割れが異なるUFCを人工海水に浸漬して、曲げ特性ならびに材質の変化を検討した。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 初期ひび割れを有するはUFCは人工海水への浸漬によって荷重-CMOD曲線が変化し、最大荷重が増加した。とくに初期ひび割れ幅が小さい0.1mmの場合に最大荷重が大きく増加する傾向となった。
- (2) UFCの初期ひび割れ幅が小さい0.1mmの場合は卓越した1本のひび割れからCl⁻が浸入し、UFCの初期ひび割れ幅が大きい0.5mmならびに1.0mmの場合には多数のひび割れを通じてCl⁻が浸入した。いずれの場合もひび割れ部以外のUFCの緻密なマトリクスへのCl⁻拡散は進んでいない。
- (3) 人工海水に浸漬することでUFCの初期ひび割れ深さが減少した。UFCが豊富に含む未水和セメントはひび割れを通じて浸入した人工海水によって水和を生じている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー113 高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，2004
- 2) 河野克哉，川口哲生，武者浩透，小林忠司：プレストレストコンクリート橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの供用10年間の耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 262-267，2014
- 3) 三輪茂雄：粉粒体工学，朝倉書店，pp. 140-145，1972