海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの初期ひび割れが曲げ特性に及ぼす影響

太平洋セメント(株) 正会員 ○河野 克哉 正会員 川口 哲生 正会員 中山 莉沙
北海道大学大学院 正会員 橋本 勝文 フェロー 横田 弘 学生会員 上松瀬 慈

1．はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(以下，UFC)は，鋼材に匹敵する高い圧縮強度とともに鋼繊維の混入によって高靭性を示し，さらに高流動性や高耐久性を備えた材料である．UFC の内部に混入された鋼繊維は緻密なマトリクスで保護されるため，ほとんど腐食しない．しかし，UFC がひび割れた場合にはひび割れ間で架橋した鋼繊維が腐食して伝達応力の低下が懸念される．そのため，本研究では初期ひび割れを導入した UFC を人工海水に長期間浸漬し，曲げ試験に供することで，ひび割れた UFC の耐久性を検討した．

2．実験概要

(1) 使用材料ならび配合

表 1 に示した低熱セメント(C)とシリカフューム(SF)を予め混合した結合材(B)，珪砂(S)，鋼繊維(F)および高性能減水剤(SP)を用いた．**表 2** に示すように配合は，結合材を各粒子の平均径(C は 20 μm，SF は 1.3 μm)と空隙率(いずれも 0.5)を用いて Furnace の最密充填理論[1)]から算出した体積混合比 C : SF=8 : 2 とし，水結合材比(W/B)を 13.2%(体積比で 40%)，繊維混入率(V_f)を内割体積比で 2.0%とした．

(2) 練混ぜならび養生

パン型強制ミキサ(容量 100L)に B，水，SP を投入して 7 分間の練混ぜを行い，さらに F を投入して 2 分間の練混ぜを行った．UFC は所定の型枠に打ち込んで，封緘養生(20℃，24h)の後で脱型し，蒸気養生(昇温速度 15℃/h，最高温度 90℃，最高温度保持時間 48h，降温速度 15℃/h)を行った．

(3) 供試体の初期ひび割れ導入方法

養生終了後にカッターで切欠きを設けたはりを供試体とし，**図 1** に示すような 3 点曲げ試験でひび割れ肩口開口変位(*CMOD*)を計測しながら除荷後の初期ひび割れ幅(w_i)を 0.0mm, 0.1mm, 0.5mm および 1.0mm の 4 水準に設定した．

(4) 供試体の人工海水浸漬方法

初期ひび割れを導入した供試体は，**図 2** に示すように市販の人工海水(試験研究用)に，切欠きの肩口部から 5mm の深さとなるように浸漬し，毛管現象にてひび割れ部へ海水成分を浸透させた．室温 20℃で 12 か月間，室温 30℃で 36 か月間の浸漬を行い，期間中は 1 か月に 1 度の頻度で海水を全量交換した．

表 1 使用材料

種類	名称	略号	物性または成分
結合材 (B)	低熱セメント	C	比表面積 3330cm^2/g，密度 3.22g/cm^3
	シリカフューム	SF	比表面積 10m^2/g，密度 2.40g/cm^3
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.6mm，密度 2.61 g/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 UFC の配合

W/B	V_f	単位量 (kg/m^3)						Flow*^{2}	f_c'
(%)	(%)	W	C	SF	S	F	SP*^{1}	(mm)	(N/mm^2)
13.2	2.0	180	1146	214	927	157	24	277	210

*^{1} W の一部に内割置換 *^{2} 落下振動無し

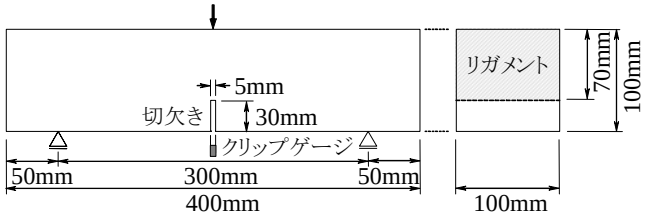

図 1 切欠きはり供試体の 3 点曲げ試験方法

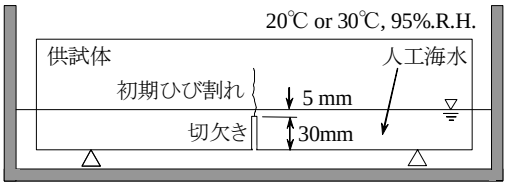

図 2 切欠きはり供試体の人工海水浸漬方法

(5) 曲げ試験方法

海水への浸漬前後において，**図 1** に示した切欠きはりの 3 点曲げ試験から荷重－*CMOD* 曲線を測定した．

(6) 塩素(Cl)の面分析ならびに SEM 観察

海水浸漬後の供試体から初期ひび割れを含む形で試料(断面 70×70mm)を切り出し，EPMA による塩素の面分析を行った．EPMA 分析後の試料から SEM 用の試料(断面 20×40mm)を切り出して観察に供した．

キーワード 超高強度繊維補強コンクリート，鋼繊維，初期ひび割れ，海水，曲げ試験，EPMA
連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL. 043-498-3804

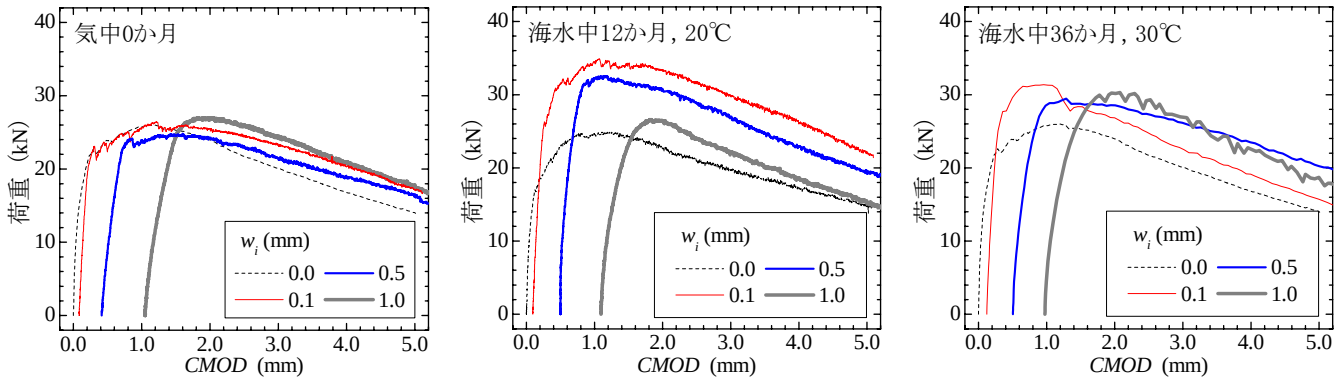

図 3 海水に浸漬した UFC の初期ひび割れ幅が荷重－*CMOD* 曲線に与える影響

3．結果と考察

(1) 初期ひび割れを有する UFC の荷重－*CMOD* 曲線

図3は初期ひび割れ幅が異なるUFCを海水に浸漬する前，温度20℃で12か月間浸漬した後および温度30℃で36か月間浸漬した後の荷重－*CMOD* 曲線をそれぞれ示したものである．初期ひび割れが無い UFC の場合(w_i=0.0mm)，海水浸漬の温度ならびに期間が異なってもピーク荷重ならびにピーク以降の挙動は浸漬前後でほとんど変化していない．しかし，初期ひび割れを有する UFC の場合(w_i=0.1mm, 0.5mm および 1.0mm)には，海水に浸漬することでピーク荷重ならびにピーク以降の保持荷重が増加した．また，温度 20℃で海水浸漬 12 か月後の場合は，初期ひび割れ幅が小さいほどピーク荷重ならびにピーク以降の保持荷重のいずれも小さくなっている。これに対して，温度 30℃で海水浸漬 36 か月後の場合では，いずれの初期ひび割れ幅においてもピーク荷重はほぼ同程度であり，ピーク以降の保持荷重は初期ひび割れ幅が w_i=0.1mm と小さい場合よりも w_i=0.5mm ならびに 1.0mm の大きい場合の方が高くなった．

(2) 初期ひび割れを有する UFC の Cl^-濃度分布と組成解析

図 4 ならびに図 5 は初期ひび割れ幅が異なる UFC を温度20℃で12か月間浸漬した後および温度30℃で36か月間浸漬した後の Cl マッピング画像をそれぞれ示したものである．初期ひび割れ幅が増加するほど切欠き先端部から内部に生じたひび割れ本数が増加し，初期ひび割れ幅が w_i=0.1mm と小さい場合はほぼ 1 本のひび割れから，初期ひび割れ幅が w_i=0.5mm ならびに 1.0mm と大きい場合には複数のひび割れから Cl^-が浸透している．ひび割れ部分の Cl^-濃度は，海水の温度が高く浸漬期間が長い方が高くなった．また BSE 像のグレイレベルは組成に依存するために面積領域を抽出して未水和セメントが占める体積含有率を算出したところ，w_i=0.0mm の場合 41.1%，w_i=0.1mm の場合 37.9%，w_i=0.5mm の場合 37.6%および w_i=1.0mm の場合

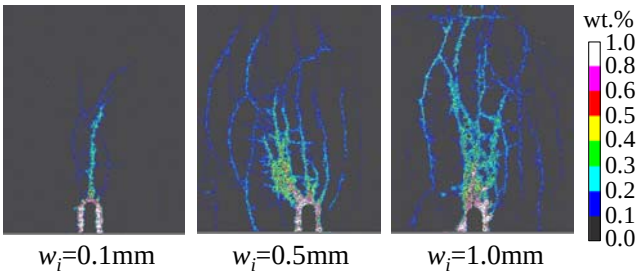

図 4 ひび割れた UFC の Cl^-濃度分布(海水中 12 か月, 20℃)

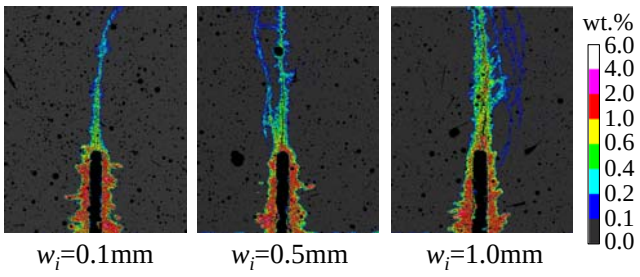

図 5 ひび割れた UFC の Cl^-濃度分布(海水中 36 か月, 30℃)

36.4%となり，初期ひび割れ幅が増加するほど減少した．これはひび割れを通じて浸入した海水が UFC 中の豊富な未水和セメントと反応したことを示唆する．実際にひび割れ近傍における SEM-EDS 定性分析では，海水由来の Mg^{2+} や CO_3^{2-}と反応した珪酸マグネシウム水和物や炭酸カルシウムが析出しており，ひび割れの閉塞現象が認められた．

4．まとめ

初期ひび割れ幅0.1～1.0mmのUFCを海水に1～3年間浸漬しても，初期ひび割れが無いUFCにくらべて曲げのピーク荷重ならびにピーク以降の保持荷重は低下しなかった．これは，豊富な未水和物を含むUFCの緻密組織では，ひび割れ部分以外にCl^-が拡散せず鋼繊維の腐食が進まないことや，海水との反応物でひび割れが閉塞することに起因するものと考える．

[参考文献] 1) 三輪茂雄 :粉粒体工学, 朝倉書店, pp.140-145, 1972