

論文 鋼繊維補強コンクリートの耐腐食性状と力学性能に及ぼす影響

古谷 亮*1・松本 浩嗣*2・二羽 淳一郎*3

要旨: 本論文では、ひび割れを有する鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の乾湿繰返し試験を実施し、ひび割れ発生後に SFRC が保有する耐腐食性状と力学性能を確認することとした。その結果、内部の鋼繊維は、初期ひび割れ幅が 1.0mm に拡大する場合に限り、局所的な腐食が一部で見られた。また、初期ひび割れ幅の拡大および乾湿繰返しサイクル数の増加に伴い、ピーク荷重および破壊エネルギーが低下した。さらに、幅 1.0mm の初期ひび割れ導入後、乾湿繰返しを 10 サイクル実施したケースに限り、引張軟化曲線の初期結合応力は、局所的な腐食の影響により大きくなることが確認された。

キーワード: 鋼繊維補強コンクリート、ひび割れ、乾湿繰返し、腐食、破壊エネルギー、引張軟化曲線

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震設計基準の見直しなどによりコンクリート構造物に対してじん性が要求されるようになってきている¹⁾。そして、じん性を向上する方法として、短繊維をコンクリートに混入した短繊維補強コンクリートが注目されている。既往の研究によると、短繊維を混入するとひび割れ面で繊維により応力が伝達されることから、ひび割れの進展を防止し、その結果、コンクリートのじん性のみでなく、せん断耐力を向上する効果があることが報告されている²⁾。特に、鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber Reinforced Concrete: 以下, SFRC)は、材料自体が安価で、かつ引張強度や弾性係数が高いことなどから、繊維補強コンクリートの中でも多用されている。

SFRC の引張特性は、鋼繊維の効果に大きく依存しているため、耐久性照査の観点から鋼繊維の腐食抵抗性の評価は重要である。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、鋼繊維はコンクリート表面近傍にも分布するため、表面付近の鋼繊維は腐食しやすく、さび汁が発生して、美観を損ねることもある³⁾。しかしながら、鋼繊維の腐食に関して実験的に検討した例は少なく、SFRC の適用範囲を広げるためには高塩分環境下における耐久性を確認することが重要である。

加えて、SFRC 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、土木学会の定めるひび割れ幅の限界値は、主として鉄筋腐食に対する耐久性の照査に用いるものであるため、鉄筋腐食だけでなく、鋼繊維の腐食を考慮したひび割れ幅の限界値の必要性を検討する必要がある。

そこで本研究では、SFRC の耐腐食性状と力学性能の把握を目的とし、初期ひび割れ幅および乾湿繰返しサイクル数を実験パラメータとした SFRC の乾湿繰返し試験と曲げ載荷試験を、図-1 に示すフローで実施した。これにより、ひび割れ発生後の SFRC が保有する耐腐食性状と力学性能を検討した。

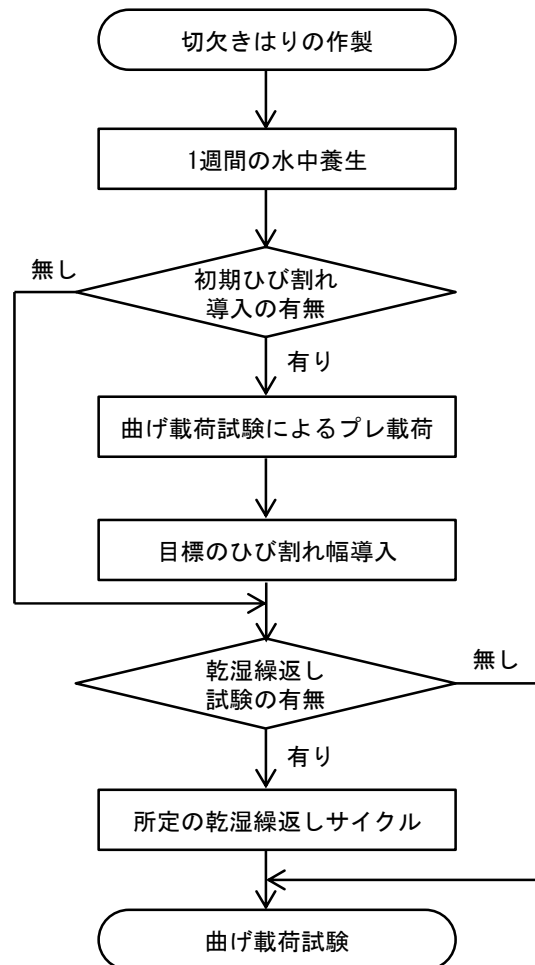


図-1 実験フロー

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および計画配合

表-1 に、本研究で用いたコンクリートの計画配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメント(C, 密度 3.14g/cm³), 細骨材には小櫃産陸砂(S, 密度 2.59g/cm³), 粗骨材には青梅産碎石(G, 密度 2.61g/cm³)を用いた。混和剤には高性能 AE 減水剤(SP, 密度 1.10g/cm³)を用いた。ここで、鋼繊維の腐食を促進する目的で、塩化物イオン量(Cl⁻)が 13kg/m³ となるように練混ぜ水に塩化ナトリウム(NaCl)を添加した。なお、塩化物イオン量は、コンクリート標準示方書に示されている飛沫帯の塩化物イオン濃度(C₀=13kg/m³)を参考に決定した。また、表-2 に使用した鋼繊維(F)の物性を示す。

2.2 供試体の作製方法

100×100×400mm の角柱供試体を JCI-S-002-2003「切欠きはりを有した繊維補強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⁴⁾。ただし、コンクリート打設前に、切欠き作製の厚さ 5mm のアクリル板を型枠に貼付し、脱型時にこれを引き抜くことにより、切欠きを作製した。

これらの供試体は打設から 24 時間後に脱型し、1 週間の水中養生(20±2℃)を行った。

2.3 力学性能と耐腐食性状の評価方法

(1) 曲げ載荷試験

初期ひび割れ導入時および後述の乾湿繰返し試験終了後に曲げ載荷試験を行った。図-2 に供試体および曲げ載荷試験の概要を示す。スパン 300mm の供試体に対し、万能材料試験機を用いて静的一点載荷をしながら、荷重、切欠き先端開口変位(以下、CTOD)および荷重点変位(以下、LPD)を測定した。なお、CTOD の測定にはπ型変位計を、LPD の測定には変位計をそれぞれ用いた。求めた荷重-LPD 曲線に基づき「繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重-変位曲線の計測方法およびタフネスの評価方法」に準じて破壊エネルギーG_Fを算出した⁵⁾。さらに、得られた荷重-LPD 曲線を用いて引張軟化曲線を同定した⁶⁾。ここで、実際には乾湿繰返し中に変化する可能性があるが、初期ひび割れ導入時の CTOD の残留変位を初期ひび割れ幅と定義した。また、鋼繊維を混入した供試体を完全に分断するまで曲げ載荷試験を継続す

るのは困難であるため、ひび割れ発生後の最大荷重とその下降域が十分に確認できた時点(LPD=15mm)で曲げ載荷試験を終了し、その時点で破壊したものと仮定してG_Fの計算を行った。

本研究では、除荷後の残留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、残留ひび割れ幅が 0mm(ひび割れ無), 0.5mm(2012 年制定コンクリート標準示方書におけるひび割れ幅の限界値¹⁾), 1.0mm(限界値を大きく超える場合)となるよう目標の初期ひび割れ幅を設定した。ここで、それぞれの供試体の初期ひび割れ導入後の様子を図-3 に示す。

(2) 耐腐食性状の評価

後述する乾湿繰返しサイクル後、曲げ載荷試験前に、目視により供試体表面の劣化状況を観察した。また、曲げ載荷試験後に、供試体破断面における鋼繊維の劣化状況を観察した。

表-1 コンクリートの計画配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				F ^{※2} (%)	
			W ^{※1}	C	S	G		
20	55	45	188	342	768	950	3.42	1.0

※1: W には Cl⁻ が 13kg/m³ に相当する NaCl を含む。

※2: 全体積に対する百分率。

表-2 鋼繊維の物性

繊維形状	両端フック加工
繊維長	30 mm
直径	0.62 mm
アスペクト比	48
密度	7.85 g/cm ³
引張強度	1080 N/mm ²
弾性係数	210 kN/mm ²

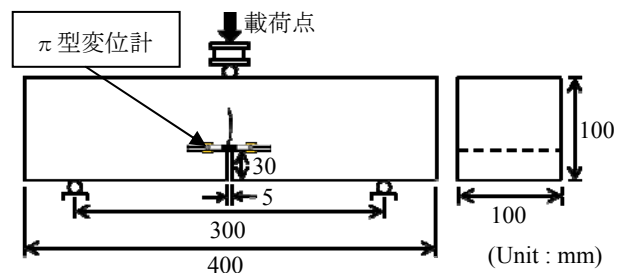


図-2 供試体および曲げ載荷試験の概要

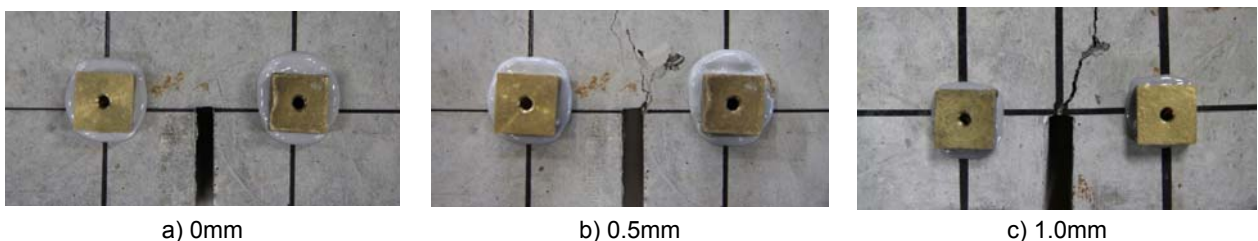


図-3 初期ひび割れ導入後の様子

2.4 乾湿繰返し試験

供試体を環境制御室に静置し、JCI-SC3「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進試験方法—乾湿繰返し法—」に基づき⁵⁾、湿潤期間(温度 60℃, 相対湿度 95%)を 3 日間, 乾燥期間(温度 10℃, 相対湿度 40%)を 4 日間, 計 7 日間を 1 サイクルとして腐食の促進を行った。

本研究では, 0 サイクル(乾湿繰返しなし), 5 サイクル, および 10 サイクル時点で曲げ載荷試験を行った。

3. 実験結果

3.1 耐腐食性状

(1) 供試体表面の劣化状況

初期ひび割れを導入していない乾湿繰返し 10 サイクルまでの供試体表面の劣化状況を図-4 に示す。図-4 より, 乾湿繰返しサイクルが 5 サイクル, 10 サイクルと増加するに従い, さびが目立つようになり, 供試体表面の鋼繊維腐食が進行することが確認された。

また, 図-5 に示すように, 腐食によるひび割れとは別に, 5 サイクルから 10 サイクルにかけて, 収縮ひび割れと思われる無数のひび割れが確認された。表-3 に示す圧縮強度試験結果から, このひび割れによるマトリクスの強度低下が考えられたことを, 参考として付記する。

(2) 内部鋼繊維の腐食性状

曲げ載荷試験終了後の破断面の様子を図-6 に示す。なお, すべての供試体で鋼繊維の破断は見られなかった。

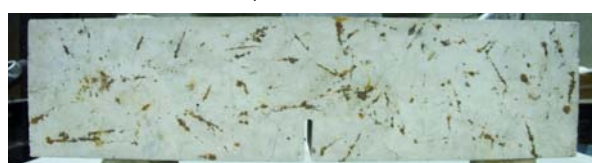
初期ひび割れを導入していない供試体においては, 乾湿繰返し 10 サイクルまででは, 表面に露出している鋼繊維の腐食は認められるものの, 内部の鋼繊維に腐食は認められなかった。また, 初期ひび割れ幅 0.5mm のものに



a) 0 サイクル



b) 5 サイクル



c) 10 サイクル

図-4 供試体表面の劣化状況

についても, 本研究の範囲では腐食をしないことが確認された。

ただし, ひび割れ幅が 1.0mm まで拡大すると, 導入されたひび割れに沿った局所的な腐食が一部で見られた。

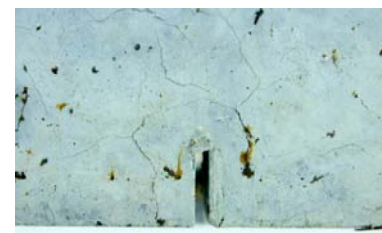
3.2 荷重-LPD 曲線

図-7 に, 同一サイクル数における荷重-LPD 曲線(すなわち初期ひび割れ幅の影響)を, 図-8 に, 同一初期ひび割れ幅における荷重-LPD 曲線(すなわち乾湿繰返しサイクル数の影響)を示す。なお, 荷重-LPD 曲線は, 4 個の供試体の平均値で示しており, 平均化は, 任意の同一変位に対する各供試体の荷重の平均値をとっている。

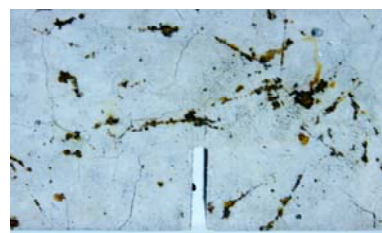
ただし, 初期ひび割れ幅 0.5mm および 1.0mm のケースでは, 乾湿繰返し試験後を初期値としており, 初期ひび割れ導入のためのプレ載荷の影響が含まれている。この影響は, 後述の 3.3 および 3.4 で述べる破壊エネルギー



a) 0 サイクル



b) 5 サイクル

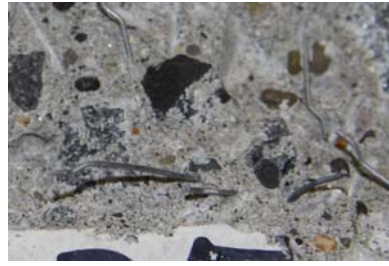


c) 10 サイクル

図-5 収縮ひび割れ

表-3 圧縮強度試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)
乾湿繰返し前	41.0
0mm 5 サイクル	36.2
0.5mm 5 サイクル	36.9
1.0mm 5 サイクル	
0mm 10 サイクル	33.0
0.5mm 10 サイクル	
1.0mm 10 サイクル	



a) 0 サイクル



b) 0mm 5 サイクル



c) 0.5mm 5 サイクル



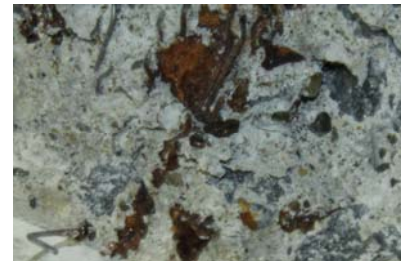
d) 1.0mm 5 サイクル



e) 0mm 10 サイクル



f) 0.5mm 10 サイクル



g) 1.0mm 10 サイクル

図-6 供試体破断面の鋼繊維腐食状況

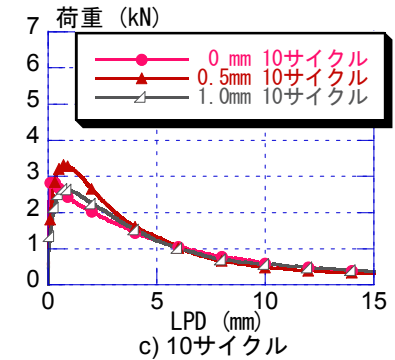
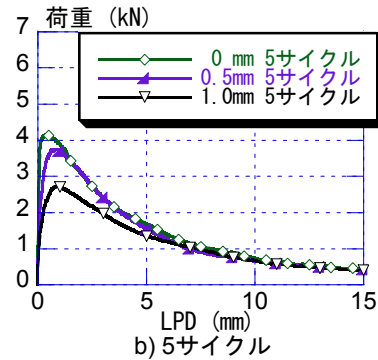
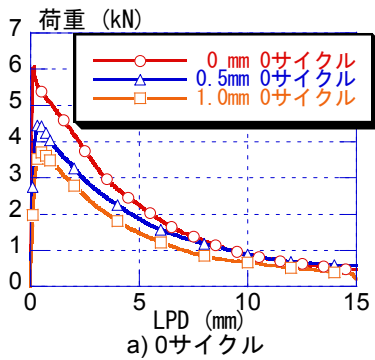


図-7 同一サイクル数における荷重-LPD 曲線

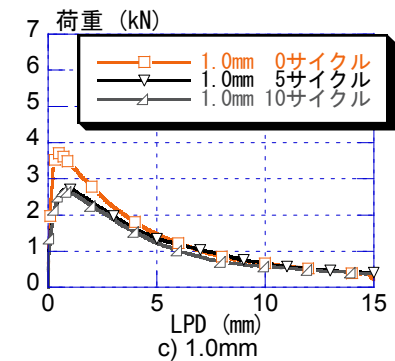
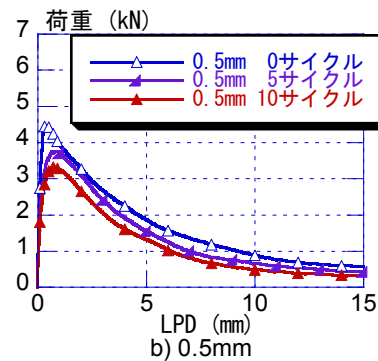
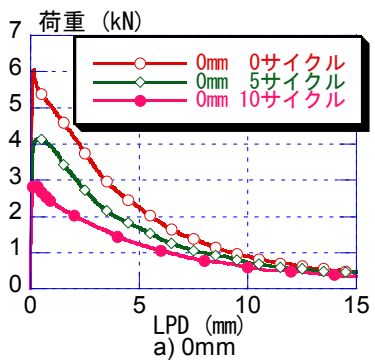


図-8 同一初期ひび割れ幅における荷重-LPD 曲線

一と引張軟化曲線にも含まれている。

まず、ピーク荷重に注目すると、初期ひび割れ幅が拡大するほど、また、乾湿繰返しサイクル数が増加するほど、低下する傾向がみられた。荷重の低下率を考えると、例えば、図-7より0サイクル時において、初期ひび割れなしのものから初期ひび割れ1.0mmでは、ピーク荷重が39%低下したが、10サイクル時ではこれが10%にまで低下率が小さくなっている。一方、図-8では初期ひび割れ0mmにおいて、0サイクルから10サイクルまでに51%、初期ひび割れ1.0mmでは30%低下している。加えて、0mm 0サイクルの健全状態から1.0mm 10サイクルの低下率が56%であることを考慮すると、ピーク荷重には乾湿繰返しサイクル数の影響が大きいと考えられる。これは、前節の結果を踏まえると、鋼繊維の局所的な腐食が影響を及ぼしたとは考えにくく、収縮ひび割れによるコンクリート自身の劣化によるものではないか、と考えられる。

また、ポストピークに関しては、全ケースで同様の傾向を示し、LPDが15mmまでの範囲では、緩やかに低下する挙動を示した。

3.3 破壊エネルギー

荷重-LPD 曲線から式(1)にてそれぞれの破壊エネルギーを算定した。

$$G_F = \frac{W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここで、

W_0 : 荷重-LPD 曲線下の面積 (N・mm)

W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)

A_{lig} : リガメントの面積 (=7000mm²)

図-9に、同一サイクル数における破壊エネルギーを、図-10に、同一初期ひび割れ幅における破壊エネルギーを示す。

前節と同様、破壊エネルギーも初期ひび割れ幅の拡大あるいは乾湿繰返しサイクル数の増加に伴って低下する傾向を示した。ただし、繊維を混入していない普通コンクリートの破壊エネルギーが一般的に0.1N/mm程度と言われている中で、本研究のような腐食促進環境下であっても、SFRCは優れた破壊力学特性を示した。

3.4 引張軟化曲線

それぞれの荷重-LPD 曲線から引張軟化曲線を同定した。図-11に同一サイクル数における引張軟化曲線を、図-12に同一初期ひび割れ幅における引張軟化曲線を示す。

鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線は、ひび割れ直後の急激に結合応力が低下する第一勾配と、ひび割れの拡大にともない応力が緩やかに減少していく第二勾配に分けることができる。

第一勾配では、初期結合応力に注目する。図-11および図-12より、健全状態である0mm 0サイクルの初期結合応力が最も大きく、ひび割れ幅の拡大、乾湿繰返しサイクル数の増加に伴い徐々に小さくなる傾向を示した。しかしながら、1.0mm 10サイクルの場合のみ、0.5mm 10サイクル、1.0mm 5サイクルよりも大きな初期結合応力を有した。これは、3.1(2)で示した通り、初期ひび割れ幅が1.0mmになると鋼繊維に局所的な腐食が生じ、この鋼繊維の軽微な腐食により、コンクリートとの付着が一時的に向上したからではないかと考える。

また、Jongvivalsakulらによると⁷⁾、鋼繊維によるせん断補強効果は、引張軟化曲線の第二勾配で支配的である

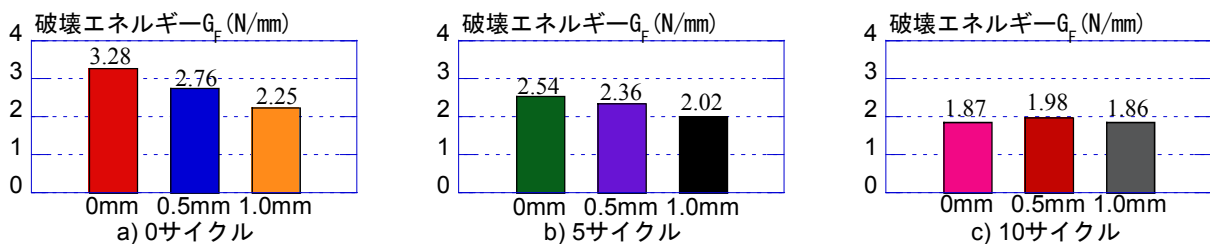


図-9 同一サイクル数における破壊エネルギー

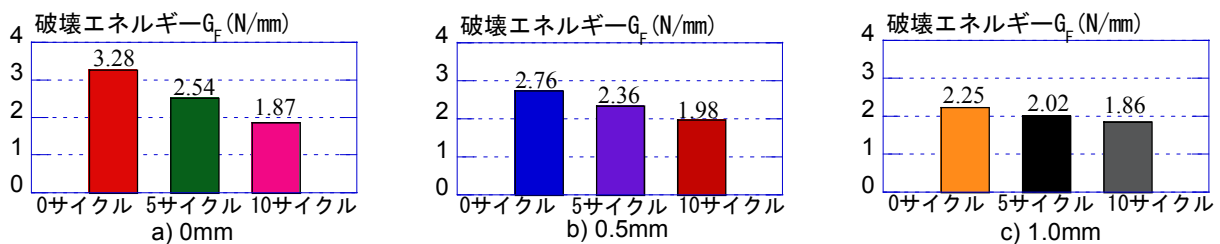


図-10 同一初期ひび割れ幅における破壊エネルギー

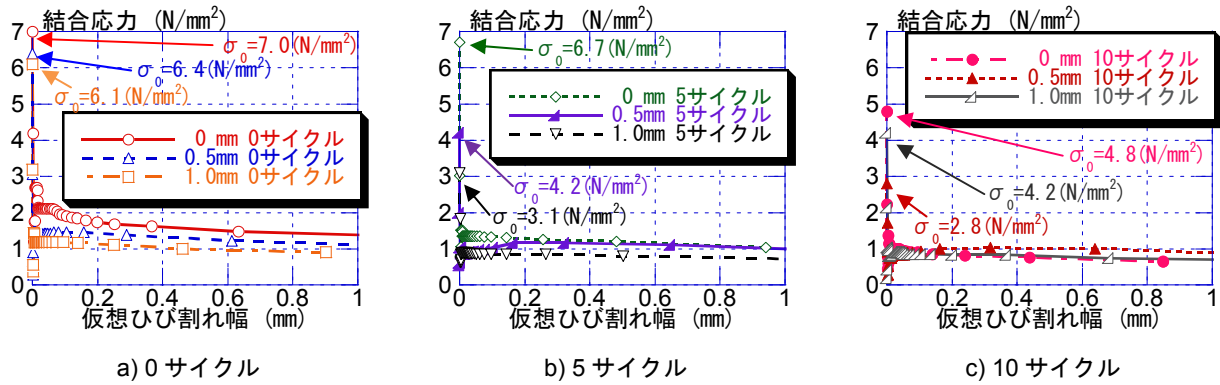


図-11 同一サイクル数における引張軟化曲線

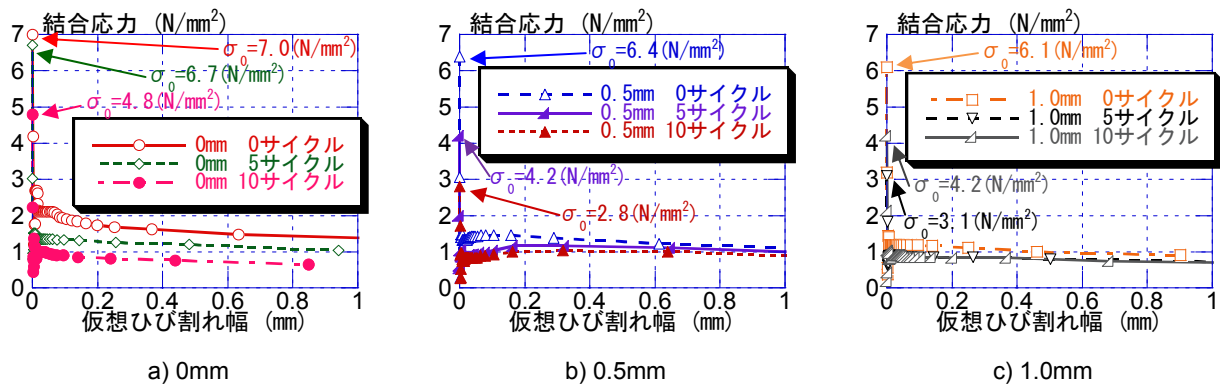


図-12 同一初期ひび割れ幅における引張軟化曲線

と述べている。しかしながら、本研究の範囲では第二勾配に明確な差異は見られず、初期ひび割れ幅 1.0mm、乾湿繰返し数 10 サイクル以内の範囲では、鋼繊維腐食が構造性能に与える影響は比較的小さいものと推察される。

4. 結論

本研究では、初期ひび割れ幅および乾湿繰返しサイクル数を実験パラメータとした SFRC の腐食促進試験を実施し、SFRC の耐腐食性状と力学性能を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 供試体表面では鋼繊維腐食と収縮ひび割れが確認された。内部の鋼繊維は初期ひび割れ幅が 1.0mm に拡大した場合に限り、局所的な腐食が一部で見られた。
- (2) SFRC の曲げ強度は初期ひび割れの導入および乾湿繰返しにより低下する。
- (3) 初期ひび割れ幅および乾湿繰返しサイクル数の増加に伴って、SFRC の破壊エネルギーは低下する。
- (4) 引張軟化曲線では、幅 1.0mm の初期ひび割れ導入後、乾湿繰返しを 10 サイクル行ったケースに限り、初期結合応力が局所的な腐食の影響で大きくなったと考えられた。しかしながら、第二勾配に明確な差異は認められず、鋼繊維腐食が構造性能に与える影響は

比較的小さいものと推察される。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2012
- 2) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），1999.11
- 3) 真嶋光保，幸左賢二，大野定俊：繊維補強セメント/コンクリート複合材料，技報堂出版，1994
- 4) 日本コンクリート工学会ホームページ：
http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci_standard/r3JCI-S-002-2003.pdf
- 5) 日本コンクリート工学会：JCI 規準集(1977~2002 年度)，2004.4
- 6) 日本コンクリート工学会：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
- 7) Jongvivatsakul, P., Watanabe, K., Matsumoto, K., Niwa, J. : Evaluation of Shear Carried by Steel Fibers of Reinforced Concrete Beams Using Tension Softening Curves, Journal of Japan Society of Civil Engineers, E2 (Materials and Concrete Structures), Vol. 67, No. 4, pp.493-507, 2011