# 論文 鋼繊維腐食が鋼繊維補強コンクリートの力学性能に及ぼす影響

佐野 匠\*1·中村 拓郎\*2·二羽 淳一郎\*3

要旨:鋼繊維の腐食が鋼繊維補強コンクリートの力学性能に及ぼす影響を明らかにするために、鋼繊維の質量減少率から腐食程度を評価する方法を検討し、浸漬乾燥繰返し試験によって鋼繊維を腐食させた鋼繊維補強コンクリートの各種強度と腐食程度の関係を比較した。その結果、浸漬乾燥繰返しによって供試体表面の腐食ひび割れが顕著になるほど、鋼繊維の質量減少率が大きくなる傾向が認められ、質量減少率によって鋼繊維の腐食程度を評価できる可能性を示した。また、鋼繊維の腐食の進行にともなって、圧縮強度、静弾性係数、引張強度および破壊エネルギーなどの力学性能が低下することを確認した。

キーワード: 鋼繊維補強コンクリート, 浸漬乾燥繰返し, 腐食, 圧縮強度, 引張強度, 破壊エネルギー

#### 1. はじめに

繊維補強コンクリートは、引張強度、曲げ強度、じん性、ひび割れ抵抗性、せん断強度などの改善を目的に、不連続の短繊維をコンクリート中に混入させた複合材料であり、現在幅広く使用されている。中でも、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、鋼繊維の引張強度や弾性係数が高いなどの理由から、繊維補強コンクリートの中でも多用されている<sup>1)2)</sup>。

SFRC の引張特性は鋼繊維に大きく依存しているため、鋼繊維の腐食によって、曲げじん性やひび割れ抵抗性などの期待される性能を発揮出来ない可能性がある。経年劣化により鋼繊維が腐食する危険性がある SFRC を維持管理するためには、鋼繊維の腐食と、SFRC の力学性能の関係を明らかにする必要がある。古谷らは鋼繊維が腐食した SFRC では、初期ひび割れ幅と乾湿繰返し数の増加にともなって破壊エネルギーが低下することを報告している 3)。しかしながら、既報では鋼繊維の腐食程度の定量的な評価は行っておらず、鋼繊維の腐食程度とSFRC の力学性能の関係については十分に明らかにされていない。

本研究では、鋼繊維の腐食が鋼繊維補強コンクリートの力学性能に与える影響を明らかにすることを目的に、質量減少率から鋼繊維の腐食程度を評価する方法を検討するとともに、浸漬乾燥繰返し試験によって鋼繊維を腐食させた SFRC の圧縮強度試験、割裂引張強度試験、3点曲げ試験を実施した。

### 2. 実験概要

# 2.1 試験体概要

(1) 使用材料および配合

表-1 に使用材料を、表-2 に本研究で用いた SFRC

の配合を示す。鋼繊維の混入率は、体積比で 0.5 %、1.0 %、1.5 %の 3 水準とした。練混ぜ水には水道水と、塩化ナトリウムの飽和溶解度となるように、塩化物イオン量 28 kg/m³となるまで塩化ナトリウムを添加した塩化ナトリウム水溶液の 2 種類を用いた。

また、鋼繊維を均等に分散させるため、コンクリートは高流動コンクリートとし、スランプフローは 400~450 mm の範囲を目標に管理した。

#### (2) 供試体の作製方法

圧縮強度試験用に φ 100×200 mm, 割裂引張強度試験 用に φ 100×150 mm の円柱供試体を, 3 点曲げ試験用に 100×100×400 mm の角柱供試体を作製した。作製した 供試体は打設から 24 時間経過後に脱型し,7日間水中養生を行った。3 点曲げ試験用供試体には,載荷試験直前に湿式コンクリートカッターを用いて切欠きを部分的に 導入した。

表-1 使用材料

Z - Z						
材料名	記号	性 質				
早強						
ポルトランド	C	密度:3.14 g/cm³				
セメント						
細骨材	S	表乾密度: 2.61 g/cm³				
州山 月 127	5	粗粒率:2.44				
粗骨材	G	表乾密度: 2.64 g/cm³				
祖月初		粗粒率:6.80				
高性能 AE	SP	ポリカルボン酸系				
減水剤	SP	かり カルかン 酸ポ				
増粘剤	V	セルロース系				
<b>全国《井·公任</b> ·	F	両端フック加工				
鋼繊維	Г	密度: 7.85 g/cm³				

<sup>\*1</sup> 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)

<sup>\*2</sup> 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)

<sup>\*3</sup> 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)

<b>丰</b> つ	SFRC	ᄼᇑᄉ
<del></del>	SERI.	

供試体	練混ぜ水	Binds G <sub>max</sub> W/C s/a 単位量 (kg/m³)					F					
供訊件	裸化セハ	(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	V	SP	(%)	
W-0.5%	10米10	水道水										0.5
W-1.0%											1.0	
W-1.5%	(W)	20	<i></i>	45	175	210	803	002	0.10	( (0	1.5	
S-0.5%	#= →	20	55	43	175	318	803	993	0.18	6.68	0.5	
S-1.0%	塩水										1.0	
S-1.5%	(S)										1.5	

#### 2.2 腐食促進試験

供試体中の鋼繊維の腐食を促進するため、本研究では浸漬乾燥繰返し試験を行った。図-1 に浸漬乾燥繰返し試験の概要を示す。水中浸漬期間(室温)を1日、高温乾燥期間(温度60℃、相対湿度10%)を2日、計3日間を1サイクルとした。浸漬水については、練混ぜ水を塩化ナトリウム水溶液とした供試体(以下、S供試体)には練混ぜ水と同等の塩化物イオン濃度の塩化ナトリウム水溶液(練混ぜ水と同等のNaCl濃度)を、練混ぜ水を水道水とした供試体(以下、W供試体)には水道水を用いた。乾湿繰返しそれぞれ0サイクル、10サイクル、15サイクル、20サイクルを経た供試体に対して後述する載荷試験および腐食程度の評価を行った。

## 2.3 載荷試験

本研究では,圧縮強度試験,割裂引張強度試験,3点 曲げ試験を行い、圧縮強度、静弾性係数、ひび割れ発生 強度,3点曲げ試験における最大荷重および破壊エネル ギーから力学特性を評価した。圧縮強度試験ならびに割 裂引張強度試験は、それぞれ JIS A 1108:2006「コンクリ ートの圧縮強度試験方法」, JIS A 1113:2006「コンクリー トの割裂引張強度試験方法」にしたがって実施した。な お, 割裂引張強度試験では, ひび割れ発生後の円柱供試 体が圧縮方向で荷重を分担し、引張強度を過大評価して しまうことから, 最大応力ではなくひび割れ発生強度を 用いて評価した。円柱供試体の端面中央部にひずみゲー ジを貼付し、ひずみが不連続となった時の引張応力をひ び割れ発生強度とした。3点曲げ試験は、JCI-S-002-2003 「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重ー変 位曲線試験方法」にしたがって実施した。開口変位(以 下, CMOD) は最大 5 mm まで測定し、破壊エネルギー  $G_F$ は CMOD より算出した。SFRC 供試体を完全に破断す るまで CMOD を測定することが困難なため、本研究で はCMODが5mmとなった場合を限界の開口変位とし、 それまでの破壊エネルギーを用いて比較することとした。 なお, 載荷試験時の供試体数は, 圧縮強度試験および割 裂引張強度試験は3本,3点曲げ試験は4本とした。

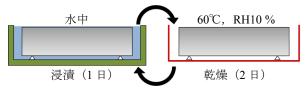


図-1 浸漬乾燥繰返し試験の概要

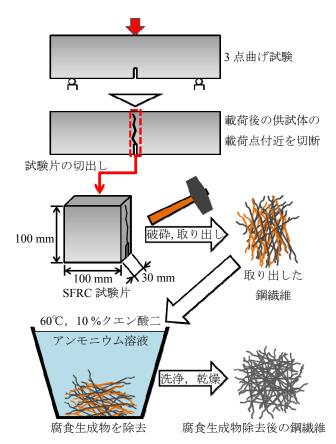


図-2 腐食程度の評価方法の概要

### 2.4 腐食程度の評価

鋼繊維の腐食程度の評価は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」の測定方法を参考に、鋼繊維の質量減少率による評価を試みた。図-2 に腐食程度の評価方法の概要を示す。所定の浸漬乾燥繰返しサイクル終了後、3 点曲げ試験を実施した切欠きはりの載荷点付近を、厚さ30 mmになるように軸方向と垂直に切断した。

この切断された部位を一つの試験片とし、これを供試体の代表値として腐食程度を評価した。次に、この試験片を、ハンマーを用いて破砕し、鋼繊維をすべて取り出した。削り出した鋼繊維を $60^{\circ}$ C、 $10^{\circ}$ 0クエン酸二アンモニウム溶液に24時間浸漬し、腐食生成物を除去した後、洗浄および乾燥を十分に行い、鋼繊維の質量を測定した。この鋼繊維の質量を試験片の体積で除し、SFRC 単位体積あたりの鋼繊維の質量  $m_n$  ( $g/cm^3$ )を算出した。また、同一配合の0 サイクル時の供試体から、0 サイクル時のSFRC単位体積あたりの鋼繊維の質量 $m_0$  ( $g/cm^3$ )を算出した。これらの鋼繊維の質量比を腐食率 $m_0$  Rとして式( $m_0$ )から鋼繊維の腐食程度を評価した。

$$R = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100(\%) \tag{1}$$

ここで、 $m_0:0$  サイクル時の SFRC 供試体の単位体積あたりの鋼繊維質量  $(g/cm^3)$ ,  $m_n:n$  サイクル時の SFRC 供試体の単位体積あたりの鋼繊維質量  $(g/cm^3)$ である。なお、1 供試体における鋼繊維量のばらつきを調査するため、同寸法で繊維混入率 1.5 %の SFRC 角柱供試体から厚さ 30 mm の試験片を 10 体切出し、前述の手法を用いて試

験片中の鋼繊維の質量を測定する予備試験も行っている。 その結果、SFRC 単位体積あたりの鋼繊維の質量の平均 値は 0.113 g/cm³、標準偏差は 0.00424 g/cm³ であった。こ のため、1 供試体中の試験片ごとの鋼繊維量は概ね同程 度であると判断し、本研究では1 試験片を1 供試体の代 表値として使用することとした。

	0 サイクル	20 サイクル
W-1.5%		
S-1.5%		

図-3 浸漬乾燥繰返し試験前後の鋼繊維の変化の例

	0 サイクル	10 サイクル	15 サイクル	20 サイクル
W-1.5%				
S-1.5%		拡大図 5mm	拡大図 8mm	拡大図

図-4 浸漬乾燥繰返し試験前後の供試体断面の変化の例

	0 サイクル	10 サイクル	15 サイクル	20 サイクル
W-1.5%				
S-1.5%	A AND DESCRIPTION	公路的建筑	TANK MAY	<b>外型</b> 轮
S-1.5% (ひび割れ図)		7216 11 120	The second	

図-5 供試体表面のひび割れ状態の例

### 3. 実験結果と考察

### 3.1 鋼繊維の腐食

### (1) SFRC 供試体中の鋼繊維の変化

図-3 に浸漬乾燥繰返し試験前後の SFRC 中の鋼繊維の変化の例を示す。W 供試体内部の鋼繊維には,20 サイクル時でも腐食生成物が目視で確認できない。一方,S 供試体には,浸漬乾燥繰返し試験により SFRC 供試体内の鋼繊維が腐食し、腐食生成物が発生していることが確認できる。図-4 に浸漬乾燥繰返し試験前後の供試体断面の例を示す。W 供試体は0 サイクル時,20 サイクル時ともに鋼繊維は金属光沢を保っており、供試体内部において鋼繊維は腐食していないものと考えられる。一方で、S 供試体では表面付近の鋼繊維が腐食し、15 サイクル時で表面から8 mm,20 サイクル時で表面から13 mmの位置まで腐食生成物が発生していた。S 供試体では浸漬乾燥繰返しサイクルの経過に伴って鋼繊維の腐食が供試体内部へと進展したことが確認できた。

#### (2) 供試体表面の変化

図-5にW供試体、S供試体それぞれの表面の写真及びS供試体の表面のひび割れ図の一例を示す。W供試体における変状は、供試体表面に露出している鋼繊維が数本発錆する程度であり、供試体表面にひび割れを確認することは出来なかった。一方で、S供試体では浸漬乾燥繰返しサイクルが進むにつれ、供試体表面の錆が目立つようになり、それに併せてひび割れも顕在化した。この傾向は繊維混入率が高い供試体ほど顕著となった。クラックスケールを用いてS供試体表面のひび割れ幅を測定した結果、20サイクル時で最大幅0.15 mm のひび割れが確認された。

## (3) 腐食率

図-6 に前述した方法で測定した鋼繊維の腐食率と浸 漬乾燥繰返しサイクル数の関係を示す。腐食率は供試体 4 体の平均値であり、図中の破線は前述した浸漬乾燥繰 返しサイクルを受けていない供試体における鋼繊維質量 の標準偏差である。本研究では、この標準偏差を超える 値を示す場合, 供試体中の鋼繊維質量のばらつきではな く鋼繊維の腐食による質量減少であると判断した。練混 ぜ水に水道水を使用した W 供試体では, 浸漬乾燥繰返し 試験による腐食率の増減は認められない。その一方で、 練混ぜ水に塩水を使用した S供試体は,10 サイクル時で 最大 4.5 %, 15 サイクル時, 20 サイクルで最大 9 %まで 腐食率が増大している。また、繊維混入率が高いほど、 腐食率の上昇が顕著になる傾向が確認できる。これは前 述の供試体表面の錆やひび割れ性状と同様の傾向を示し ており,鋼繊維の質量減少率から求めた腐食率によって, SFRC 中の鋼繊維の腐食程度を評価できる可能性が示さ れた。

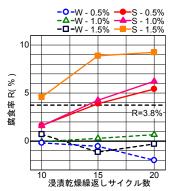


図-6 腐食率と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係

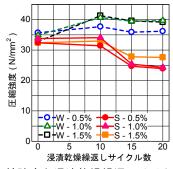


図-7 圧縮強度と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係

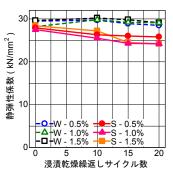


図-8 静弾性係数と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係

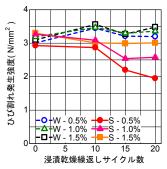


図-9 ひび割れ発生強度と浸漬乾燥繰返し サイクル数の関係

### 3.2 載荷試験結果

### (1) 圧縮強度

図-7 に圧縮強度と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係を、図-8 に静弾性係数と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係を示す。W供試体において、0 サイクル時に比べ10

サイクル時の圧縮強度は平均16%程度,静弾性係数は平 均3%程度増大している。これは浸漬乾燥繰返し試験に おいて、浸漬時に水が供給され、その後高温環境下に置 かれるため水和反応が促進されたことが原因と考えられ る。また、15 サイクル時、20 サイクル時において、圧縮 強度が10サイクル時に比べ低い値を示している。これは、 水和反応による強度発現が限界に達したためと考えられ る。繊維混入率の差によって同一の浸漬乾燥繰返しサイ クルでも圧縮強度に差が生じているが、その差は最大で も 10 %程度であり、繊維混入率が圧縮強度に与える影響 は小さい。S 供試体において、0 サイクル時の圧縮強度 はW供試体と同程度であるが、10サイクル時ではW供 試体と異なり、圧縮強度が増大しなかった。さらに、15 サイクル時では0サイクル時の約80%程度まで圧縮強度 が低下している。また、静弾性係数は0サイクル時にお いて W 供試体と同程度だが、0 サイクル時に比べ10 サ イクル時で平均 5%程度, 15 サイクル時で平均 10%程度 低下している。これは、鋼繊維に発生した腐食生成物に より、供試体に発生したひび割れの影響と考えられる。

### (2) ひび割れ発生強度

図-9 にひび割れ発生強度と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係を示す。ひび割れ発生強度も圧縮強度と同様に、W供試体では、0サイクル時に比べ10サイクル時でひび割れ発生強度が増大している。一方、S供試体はサイクル数の経過とともにひび割れ発生強度が低下している。これは、圧縮強度や静弾性係数と同様、供試体内の鋼繊維の腐食によって発生したひび割れによる影響であると考えられる。また、繊維混入率1.5%のS供試体(S-1.5%)では、15、20サイクル時でひび割れ発生強度の低下が少ない。SFRCの引張特性は鋼繊維に依存しているため、この差が生じたと考えられる。

### (3) 3 点曲げ試験における最大荷重と破壊エネルギー

図-10に3点曲げ試験におけるの最大荷重と浸漬乾燥繰返し試験サイクル数の関係を、図-11に破壊エネルギー $G_F$ と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係を示す。破壊エネルギーは荷重-開口変位(CMOD)曲線から式(2)を用いて算定した。

$$G_F = \frac{\left(0.75W_0 + W_1\right)}{A_{lin}} \tag{2}$$

ここで、 $W_0$ : 荷重-CMOD 曲線下の面積( $N \cdot mm$ )、 $W_1$ : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 ( $N \cdot mm$ )、 $A_{lig}$ : リガメント部の面積( $=7000~mm^2$ )、である。 $W_0$ に関しては、先述したとおり CMOD が 5~mm に達するまで測定した。W 供試体とS 供試体どちらでも、繊維混入率が高い供試体では、3~点曲げ試験における最大荷重や破壊エネルギーは向上する傾向があり、腐食率が高くなってもこの傾向に変化はなかった。最大荷重および破壊エ

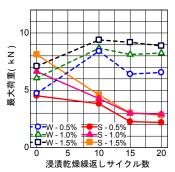


図-10 最大荷重と浸漬乾燥繰返しサイクル数の関係

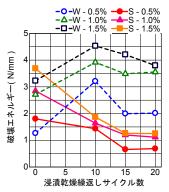


図-11 破壊エネルギーと浸漬乾燥繰返し サイクル数の関係

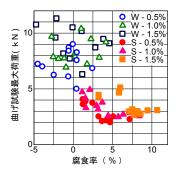


図-12 最大荷重と腐食率の関係

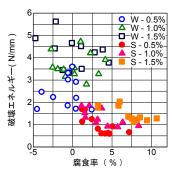


図-13 破壊エネルギーと腐食率の関係

ネルギーは、前述の圧縮強度、ひび割れ発生強度と同様の傾向が認められた。例えば、W-1.0%供試体では、最大荷重が10サイクル時で0サイクル時の20%程度増大し、15サイクル時では10サイクル時から6%程度低下している。一方で、S供試体では、サイクル数が増加するに

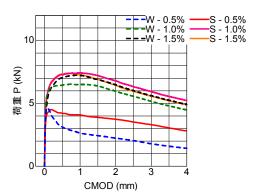


図-14 0 サイクル時の荷重-CMOD 曲線

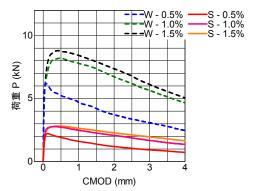


図-15 20 サイクル時の荷重-CMOD 曲線

つれ最大荷重は低下している。例えば、S-1.0%供試体において10サイクル時では0サイクル時の36%程度減少しており、15サイクル時では10サイクル時の29%程度減少している。破壊エネルギーについても、同様の傾向が認められた。W供試体では、圧縮強度と同様に浸漬乾燥繰返しサイクルで促進された水和反応の影響によって最大荷重および破壊エネルギーが増大し、S供試体では、鋼繊維の腐食によるひび割れの影響で最大荷重および破壊エネルギーが減少したと考えられる。

図-12 に最大荷重と腐食率の関係を、図-13 に破壊エネルギーと腐食率の関係を示す。腐食率の低い W 供試体の最大荷重や破壊エネルギーは腐食率の高い S 供試体に対して大きい値となっている。また、S 供試体において、腐食率が 10 %程度まで上昇した場合、最大荷重は3 kN 程度となり、破壊エネルギーは1.3 N/mm 程度となり、どちらも腐食率が低い供試体の値に比べ低下した。このことから、腐食率が増大すると最大荷重および破壊エネルギーが低下する相関が認められた。

#### (4) 荷重-CMOD 曲線

図-14 に浸漬乾燥繰返し 0 サイクル時の,図-15 に20 サイクル時における荷重-CMOD 曲線を示す。なお,荷重-CMOD 曲線は,4 供試体の平均値で示しており,平均化には,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。まず,荷重-CMOD 曲線は、繊維混入率 0.5 %の供試体と 1.0 %,1.5 %の供試体の間で曲線

の形状が大きく異なっている。0.5%の供試体はピーク荷重に達すると、すぐに荷重が下降している。一方、1.0%、1.5%の供試体は、ピーク荷重周辺の曲線の形状が0.5%の曲線に比べなだらかである。このことから、繊維混入による曲げじん性の改善効果は、繊維混入率0.5%と1.0%の間で大きく異なると考えられる。また、この傾向は、浸漬乾燥繰返しサイクル数が増加しても変化しなかった。次に、S供試体の曲線は0サイクル時ではW供試体の曲線に近い形状を示しているが、20サイクル時では全体的に荷重が低下している。浸漬乾燥繰返しサイクルの経過にともなってS供試体の表面に発生したひび割れによって曲げじん性が低下したと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、浸漬乾燥繰返し試験によって SFRC 供試体中の鋼繊維の腐食を促進し、鋼繊維の腐食程度と SFRC の力学性能の関係を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) SFRC 供試体の表層部と内部で鋼繊維の腐食程度に 違いはあるものの、浸漬乾燥繰返しサイクル数に応 じて供試体表面のひび割れが顕著になるほど鋼繊維 の質量減少率も大きくなっており、SFRC 中の鋼繊維 の腐食程度を質量減少率から評価できる可能性が示 された。
- (2) 浸漬乾燥繰返しサイクル数が増加するほど圧縮強度, 静弾性係数,引張強度,破壊エネルギーなどの力学 性能は低下する傾向にあり,鋼繊維の腐食によって SFRC の力学性能が低下することを確認した。
- (3) 繊維混入率を高くすると 3 点曲げ試験における最大 荷重や破壊エネルギーは向上する傾向があり、腐食 率が高くなってもこの傾向に変化はなかった。
- (4) 本研究で提案した腐食程度の評価方法を用いた結果, 腐食率が10%程度まで上昇した供試体では3点曲げ 試験における最大荷重が3kN程度となり,破壊エネ ルギーは1.3 N/mm程度となり,腐食率の上昇にとも なって3点曲げ試験における最大荷重と破壊エネル ギーが低下することを確認した。

### 参考文献

- 1) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2013.3
- 2) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンク リートライブラリー, 第50号, 1982.3
- 古谷亮,松本浩嗣,二羽淳一郎: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,Vol.36, No.1, pp.268-273, 2014.7