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¹⁾²⁾。

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

*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)

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φ100×200 mm,割裂引張強度試験 用にφ100×150 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。

材料名	記号	性 質					
早強							
ポルトランド	С	密度:3.14 g/cm ³					
セメント							
細骨材	S	表乾密度: 2.61 g/cm ³					
		粗粒率:2.44					
加速大	G	表乾密度: 2.64 g/cm ³					
作出 肖 72		粗粒率:6.80					
高性能 AE	SD	ポリカルギン酚ズ					
減水剤	51	ホリカルホン酸ポ					
増粘剤	V	セルロース系					
鋼繊維	F	両端フック加工					
		密度: 7.85 g/cm ³					
		~					

表一1 使用材料

供 計 体 海沢水 G _{max}		G _{max}	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				F		
	裸庇せ小	(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	V	SP	(%)
W-0.5%	水洋水	± -↓v									0.5
W-1.0%	小垣小 (W)										1.0
W-1.5%	(w)	20	55	45	175	210	802	002	0.19	6 60	1.5
S-0.5%	ち 水	20	33	43	1/3	516	803	995	0.18	0.08	0.5
S-1.0%	· 监 小										1.0
S-1.5%	(3)	(5)									1.5

表-2 SFRC の配合

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°C,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」,JISA 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-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。



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° 、10%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/cm³)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/cm³)を算出し た。これらの鋼繊維の質量比を腐食率 R として式(1)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/cm³)、 $m_n: n$ 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/cm³)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。



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	を	(広大図) 13mm

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%	· Landra Exclusion	2 体制发展		家教授系
S-1.5% (ひび割れ図)				

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



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。

$$G_F = \frac{(0.75W_0 + W_1)}{A_{lig}}$$
(2)

ここで、 W_0 :荷重-CMOD 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} :リガメント部の面積 (=7000 mm²),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



_{腐食率(%)} 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