

# 論文 電食による鉄筋の腐食が SHCC の付着性状に与える影響

中村 俊介\*1・小林 孝一\*2

**要旨:** 普通コンクリート (NC) 供試体内および SHCC 供試体内の鉄筋を電食により腐食させ、かぶりと腐食程度を要因とした供試体に対して一軸引張載荷による両引き試験を行い、各要因がひび割れの発生、鉄筋とコンクリートとの平均応力-ひずみ関係に及ぼす影響を調査した。また、電食において配合の違いが腐食に与える影響について調査した。その結果、SHCC はその微細な組織により、NC より腐食面積率、質量減少率が小さくなった。両引き試験より、腐食初期では腐食に伴う膨張圧により付着が上昇した供試体が確認された。SHCC については腐食膨張圧が NC よりも保持され、腐食による付着の低下が抑制されることにより NC とは異なる挙動を示す可能性が示唆された。

**キーワード:** SHCC, 鉄筋腐食, 両引き試験, 電食

## 1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (Strain Hardening Cement Composite. 以下 SHCC) が、鉄筋腐食が生じた RC 構造物の補修材として適用されている。SHCC はセメント系材料に有機短繊維を混ぜることによって、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化特性を示し、複数の微細なひび割れを高密度で形成する極めて高靱性な材料である。ひび割れが微細であることから物質透過抵抗性が高いとされている。

鉄筋腐食は鉄筋コンクリート (RC) 構造物の代表的な劣化機構の一つである。長期間供用された RC 構造物においては、腐食の程度の把握に加え、残存性能を適切に評価することが構造物の維持管理をするうえで重要になる。引張り、曲げが作用する RC 部材では、付着による伝達作用により引張強度を超えない範囲でコンクリートも引張力を分担しており、テンションスティフニング効果と呼ばれている。鉄筋腐食を有する普通コンクリート (以下 NC) 部材、および SHCC を用いた部材におけるテンションスティフニング効果に関する研究は現在まで

行われており<sup>1)4)</sup>、これらの研究から、腐食によりテンションスティフニング効果は減少すること、SHCC を用いた場合はその引張力負担により、部材の剛性および鉄筋降伏後の引張抵抗は鉄筋単体より大きくなることが明らかになっている。また SHCC についてはひび割れ箇所において架橋効果による引張力負担が存在することから、架橋効果による引張力を除いた SHCC 自体のテンションスティフニング効果は小さいとされている<sup>4)</sup>。しかし、鉄筋の腐食が SHCC を用いた部材のテンションスティフニング効果について言及している研究はない。SHCC はひび割れ部においても引張力を分担するため、コンクリートとは異なる付着性状を示すと予想される。

そこで本研究では、かぶり、および、劣化程度を要因とし、鉄筋を電食により腐食させたいうで、曲げ部材の引張側を想定して一軸引張載荷による両引き試験を実施した。供試体のひび割れ状況、鉄筋の腐食状況を測定して比較、検討を行い、コンクリートと SHCC の違い、および腐食状況が鉄筋の付着性状に与える影響について把握することを本研究の目的とした。

表-1 コンクリート (NC) 配合表

W/C	単位質量 [kg/m <sup>3</sup> ]				単位体積 [mL/m <sup>3</sup> ]
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
0.4	175	438	725	899	981

表-2 SHCC 配合表

W/C	単位質量[kg/m <sup>3</sup> ]								単位体積[mL/m <sup>3</sup> ]
	水	セメント	石灰石粉	6号珪砂	7号珪砂	高性能 AE 減水剤	増粘剤	PE 繊維	空気量調整剤
0.4	360	900	300	231	231	13.5	1.03	11.64	180

\*1 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博 (工) (正会員)

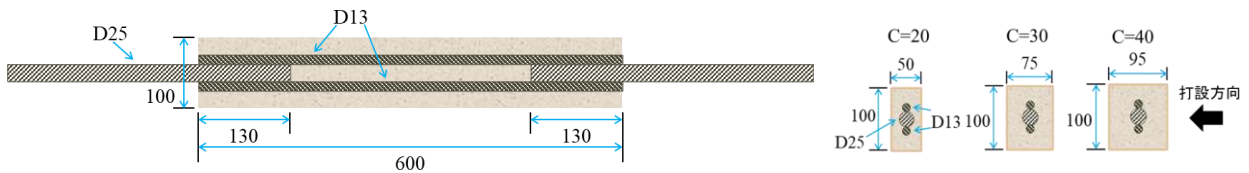


図-1 供試体概要

単位 [mm]

## 2. 実験概要

### 2.1 配合および実験要因

表-1 に普通コンクリート（以下 NC），表-2 に SHCC の配合を示す。両配合とも水セメント比を 40% に設定した。セメントは普通ポルトランドセメント，繊維は高強度 PE 繊維（繊維径 12 $\mu$ m，繊維長 12mm，密度 0.97g/cm<sup>3</sup>，引張強度 2.6 GPa，弾性係数 88 GPa）を用い，繊維混入率を体積比で 1.2% とした。SHCC は全ての固体材料をオムニミキサに入れ，30 秒程度空練り後，液体材料を入れてさらに 2 分 30 秒程度練り混ぜた。

また，表-3 に実験要因を示す。かぶりは約 20mm，30mm，40mm の 3 種類とし，劣化程度は通電流量および通電時間の積から算出した鉄筋表面積当たりの積算電流量により制御した。配合が 2 種類，かぶりが 3 種類，劣化程度が 4 種類の，合計 24 種類の組み合わせで各 2 体作製した。

### 2.2 供試体概要

供試体形状，寸法を図-1 に示す。供試体内に D13（SD295，降伏強度 363 N/mm<sup>2</sup>）を 2 本配置したが，その両端には D25（SD390，降伏強度 438 N/mm<sup>2</sup>）のネジ節鉄筋がラップ長 130 mm で溶接してある。SHCC は引張靱性が高く，引張力を分担できるために，一般的に用いられる両引き供試体のように鉄筋を 1 本配置して引張载荷すると，供試体から露出した鉄筋部分のみが変形する。そこで，供試体を引張载荷しても変形しないような十分に大きな断面をもつネジ節鉄筋を両端部に溶接した。供試体は打設後 1 日で脱型し，室温の実験室内で，水分を含んだ布で供試体を被覆することによって 28 日間湿布養生を行った。

### 2.3 電食

図-2 に電食方法を，図-3 に電食状況を示す。材齢 28 日経過後，打設時の底面を上面とし，その中央に長さ 250 mm×幅 90 mm×高さ 50 mm の口の字型の塩基板をシリコン系シーリング材で接着することにより貯水槽を取り付けた。貯水槽に濃度 3% の NaCl 水溶液を溜め，銅板を陰極，主鉄筋を陽極とし，直流電源により通電した。各劣化程度の供試体に適用した積算電流量を表-4 に示す。電食終了後，ひび割れ状況をスケッチし，NC 供試体についてはクラックスケールを用いて，SHCC 供試体についてはマイクロスコープ（倍率 200 倍）を用いてひび割れ

表-3 実験要因

要因	水準
マトリックス	NC, SHCC
W/C	40%
かぶり (C)	約 20mm, 約 30mm, 約 40mm
劣化程度	0 (=劣化なし), 小, 中, 大

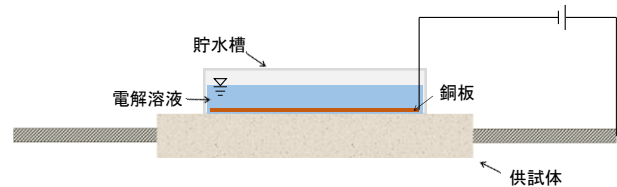


図-2 電食方法



図-3 電食状況

表-4 積算電流量

劣化程度	積算電流量
小	6.25 A・h
中	12.5 A・h
大	25 A・h

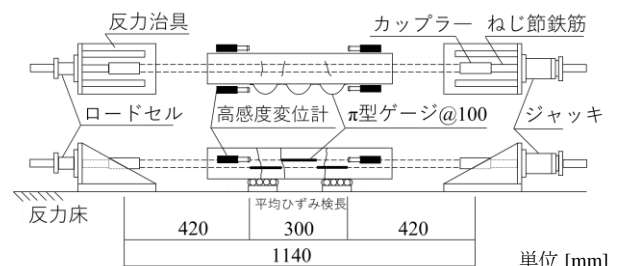


図-4 両引き試験

幅を計測した。

## 2.4 両引き試験

電食後、劣化程度中を除く供試体に両引き試験を実施した。両引き試験方法を図-4に示す。供試体両端のネジ節鉄筋にカップラーを用いて、ネジ節鉄筋 D25 を継ぎ足した。床に固定した鋼製の反力板とセンターホール型油圧ジャッキを用いて、引張荷重を行った。荷重をロードセルで計測し、供試体の変位を、剛な床にマグネットスタンドにより固定した高感度変位計を用いて、両端から内側 150mm の 2 箇所ずつ、計 4 箇所計測することにより、供試体中央 300mm の部分の伸びを求めた。両引き試験終了時に、再び供試体表面のひび割れ状況を 2.3 節と同じ方法で計測した。

## 2.5 鉄筋の腐食状態の調査

ひび割れ状況の計測後、コンクリートカッターを用い、供試体中央 340mm の部分の鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食箇所をトレースして、プランメーターにより腐食面積を測定した。その後、鉄筋を水温 60℃ に保った濃度 10% のクエン酸二アンモニウム水溶液に 8 時間浸漬した。浸漬後、鉄筋を水洗いし錆を除去した。乾燥後、質量測定を行い、質量減少率を算出した。除錆の際、腐食していない鉄筋も同時に水溶液に浸漬し、鉄筋の質量減少を測定することで、腐食した鉄筋の質量減少率の補正を行った。また、レーザー式非接触型 3D スキャナ（波長：645~660nm, 最大出力 0.39μW 未満）を用いて、除錆した鉄筋の断面積の測定を行った。なお、スキャンの円周方向ピッチは 0.36°、鉄筋軸方向ピッチは 0.4mm とし、鉄筋中央 260mm の範囲を測定した。その後、計算ソフトを用いて測定データを解析し、鉄筋の断面積を算出した。得られた断面積から測定範囲の平均断面積を求め、公称断面積から平均断面減少率を算出した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 腐食面積率と質量減少率の関係

腐食面積率と質量減少率の関係を図-5に示す。なお、各 2 体作製した供試体の平均を、同一マトリクス、かぶりの供試体ごとに直線で結んでいる。NC と SHCC のどちらも、まず腐食面積率が増加した後、質量減少率が急増した。腐食の進行に伴い腐食ひび割れが発生し、劣化因子がひび割れを通じて侵入することで、腐食が促進されたと考えられる。劣化程度が小と中の場合には、かぶりが小さい供試体の方が同一劣化程度において質量減少率および腐食面積率が大きくなる傾向が確認された。かぶりが大きい供試体より腐食ひび割れが早期に発生し、劣化因子が供給されやすいためと考えられる。図-6に質量減少率と最大腐食ひび割れ幅の関係を示す。NC 供試体、SHCC 供試体どちらも腐食量の増加に伴い、腐食ひ

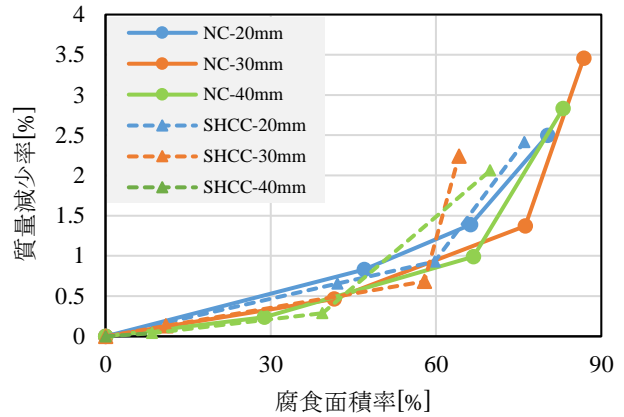


図-5 腐食面積率と質量減少率の関係

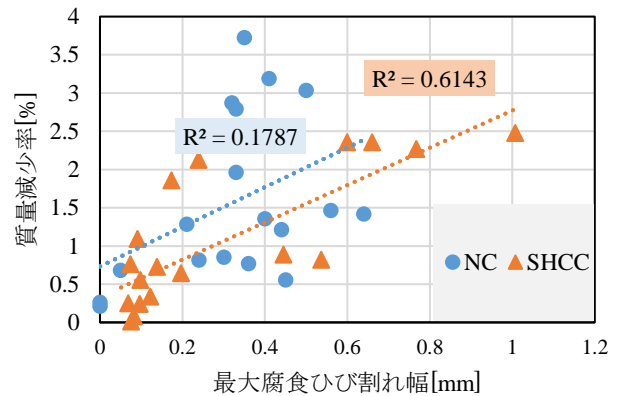


図-6 質量減少率と最大腐食ひび割れ幅の関係

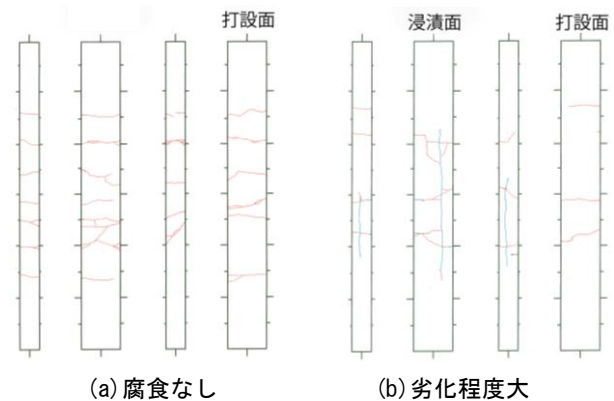


図-7 NC 供試体ひび割れ図 (C=20mm)

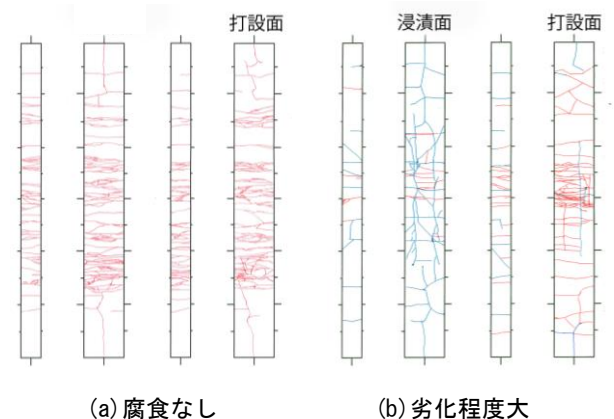


図-8 SHCC 供試体ひび割れ図 (C=20mm)

表-5 各健全供試体に生じた引張ひび割れ本数の平均

マトリックス	かぶり[mm]	引張ひび割れ本数 $N_{0,av}$ [本]
NC	20	8
	30	4
	40	3.5
SHCC	20	44
	30	27
	40	36

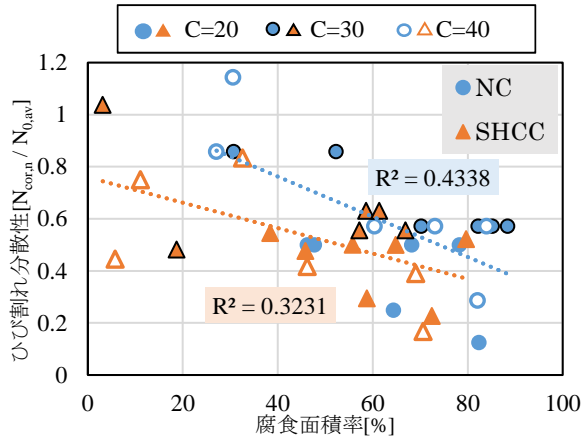


図-9 ひび割れ分散性と腐食面積率の関係

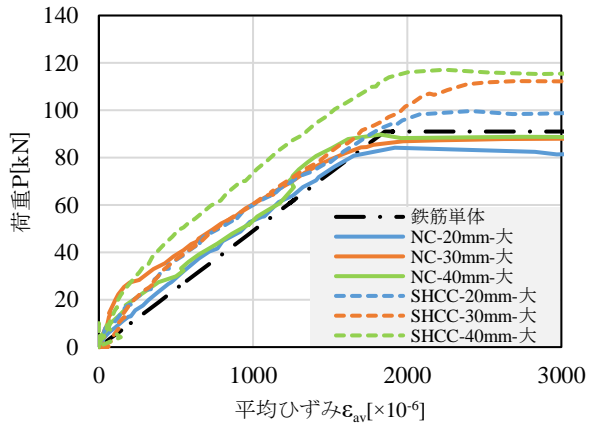
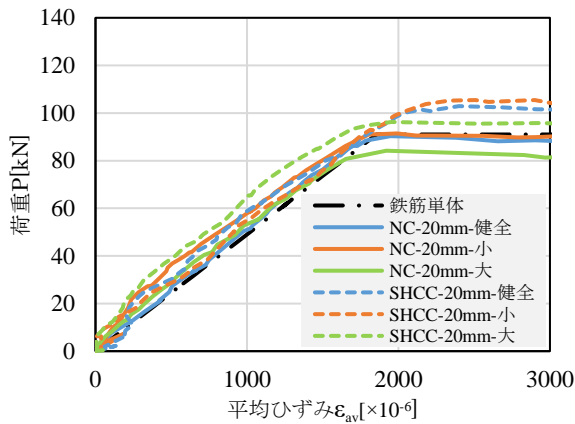


図-10 荷重—平均ひずみ関係

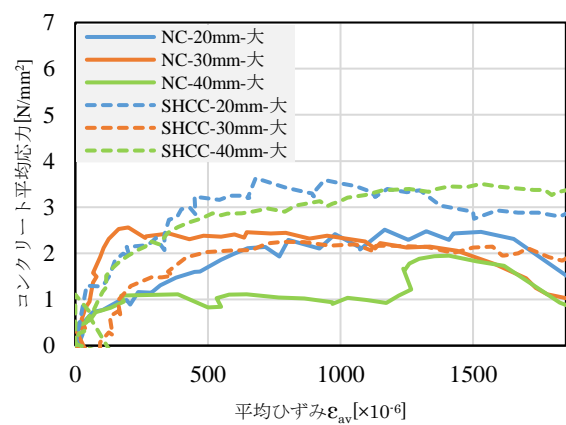
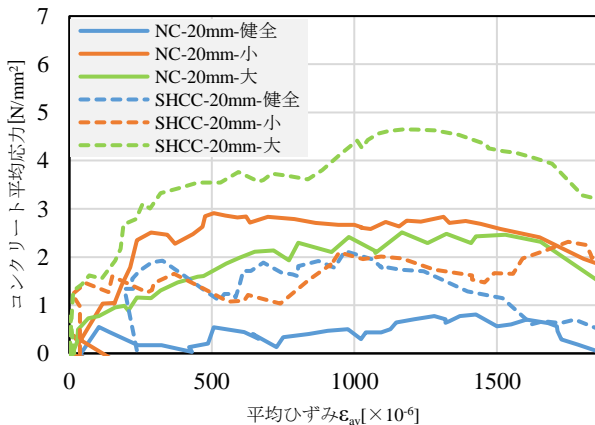


図-11 コンクリート平均応力—平均ひずみ関係

ひび割れ幅が増加する傾向が確認できた。また、NC 供試体については、ばらつきは大きいですが、SHCC 供試体より同程度のひび割れ幅に対する腐食量が大きくなる傾向を示した。

### 3.2 ひび割れ状況

図-7(a)に腐食なしの NC 供試体の載荷ひび割れの例を示し、図-7(b)には鉄筋腐食がある供試体の例を示す。SHCC 供試体についても同様に図-8 に示す。図は貯水槽を取り付けた浸漬面、左右面、背面の4面を表した展開図であり、青線は電食後に確認されたひび割れ、赤線が両引き試験後に確認されたひび割れである。SHCC 供試体では鉄筋軸方向の腐食ひび割れに加え、鉄筋軸方向に直交する腐食ひび割れが多数発生した。コンクリートに生じる引張ひび割れは荷重の増加に伴い、次々と発生していくが、ある程度ひび割れ間隔が狭まるとそれ以上には新たなひび割れは発生しなくなり、それ以降荷重を増加させると、局部的にひび割れ幅のみが増加するようになる<sup>5)</sup>。本研究では、両引き試験において平均ひずみ  $9000 \times 10^{-6}$  程度まで載荷したところ、ひび割れの局所化が確認されたため、除荷してひび割れ本数を計測した。各健全供試体に生じた引張ひび割れ本数の平均  $N_{0,av}$  を表-5 に、それに対する各劣化供試体に生じた引張ひび割れ

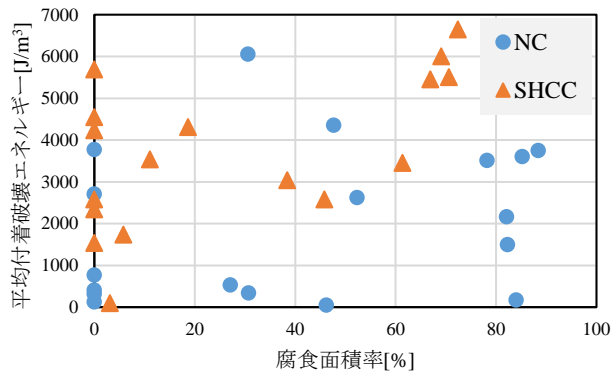


図-12 平均付着破壊エネルギーと腐食面積率の関係

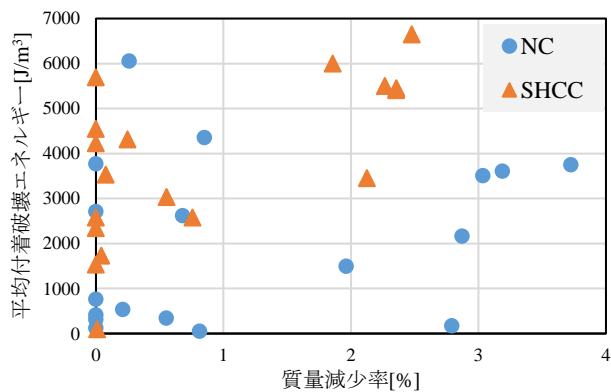


図-13 平均付着破壊エネルギーと質量減少率の関係

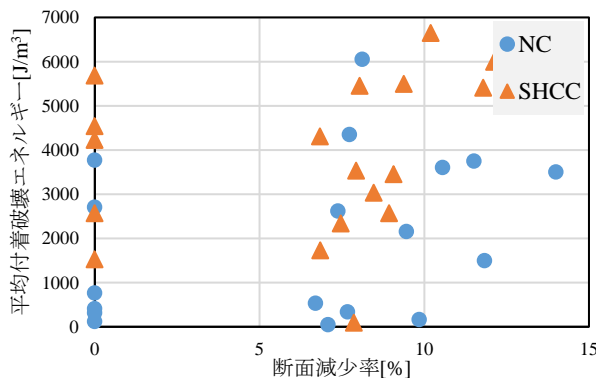


図-14 平均付着破壊エネルギーと断面減少率の関係



図-15 変位計付近のひび割れ

本数の平均 $N_{cor,n}$ の比をひび割れ分散性 $N_{cor,n}/N_{0,av}$ とし<sup>9)</sup>、ひび割れ分散性と腐食面積率の関係を図-9に示す。表-5より、SHCC供試体では、かぶり20mmの供試体の方がかぶり30mm、40mmの供試体より引張りひび割れ本数は多くなる傾向が確認された。かぶりが大きい供試体では、鉄筋との界面で発生したひび割れがかぶり内で結合した結果、表面に現れたひび割れの本数が少なくなり、また鉄筋界面のひび割れが供試体表面まで到達していないものもあり、ひび割れが少ない一因になっていると考えられる。NC供試体、SHCC供試体ともに、腐食ひび割れの発生した場合には引張りひび割れの本数が減少した。腐食により付着が失われ、引張力が鉄筋からコンクリートへ伝達されず、ひび割れが局所化したと考えられる。

### 3.3 コンクリートとSHCCの引張剛性

図-10に両引き試験で得られた荷重-平均ひずみ関係を示す。NC供試体、SHCC供試体ともに、劣化程度大では降伏荷重が小さくなった。腐食による鉄筋断面の減少および鉄筋とコンクリート間の付着が低下し、テンションスティフニング効果が小さくなったことが原因として考えられる。なお、劣化程度小は健全供試体と同程度の降伏荷重を示した。3.1節で示したように腐食の進行が鉄筋表面に留まっており、引張強度の低下にあまり寄与しなかったと考えられる。また、降伏荷重については、NC供試体では変化が見られなかったが、SHCC供試体ではかぶりが大きいほど降伏荷重が大きくなった。かぶりが大きいほどSHCCの断面積が大きく、SHCCの引張抵抗が大きいためと考えられる。一部のSHCC供試体では、両引き試験において変位計付近のひび割れが発生した影響で降伏時の平均ひずみが大きくなった。

図-11にコンクリートが負担する平均応力と平均ひずみとの関係を示す。この平均応力は、図-10に示した荷重から鉄筋の分担する荷重を差し引いて求めたが、その際、腐食鉄筋の断面積は、レーザースキャナで測定した鉄筋全長にわたる断面積分布の平均値を用い、そこにヤング係数と平均ひずみを乗じて、鉄筋の分担する荷重を求めた。降伏時の平均ひずみが大きい供試体を除き、同一条件においてSHCC供試体の方がNC供試体より平均応力-ひずみ曲線下の面積(以下、平均付着破壊エネルギー)が大きくなる傾向となった。これは、SHCC供試体のテンションスティフニング効果は小さいものの、繊維の架橋効果により引張力を負担するためである。劣化程度やかぶりについては明確な影響は確認できなかった。

本来、純粋な付着応力を算出するためには、数値解析によりひび割れ箇所での応力の非連続も考慮して検討する必要があるが、本研究ではメソスケールでの平均的な傾向を把握するために、平均付着破壊エネルギーを以下の式(1)より算出した。

$$W_b = \Sigma(\sigma_{c,av}\epsilon_{av}) \quad (1)$$

ここに、 $W_b$ ：平均付着破壊エネルギー、 $\sigma_{c,av}$ ：コンクリート平均応力、 $\epsilon_{av}$ ：平均ひずみである。

図-12 に平均付着破壊エネルギーと腐食面積率の関係を、図-13 に平均付着破壊エネルギーと腐食による鉄筋の質量減少率の関係を示す。なお、かぶりの影響については確認できなかったため、図中ではかぶりの違いは考慮せずに示している。

鉄筋腐食と最大付着応力の関係について、異形鉄筋における腐食が付着性状に及ぼす影響は、以下の相互作用であると定義されている<sup>7)</sup>。

- ① 錆による噛み合い効果
- ② 腐食膨張によるプレストレス効果
- ③ 縦ひび割れの発生によるコンクリートの拘束力の低下
- ④ 腐食による節の欠損

図-12, 13 より、鉄筋が腐食した供試体において、無腐食の供試体より平均付着破壊エネルギーが大きくなっている供試体があることが確認できる。腐食生成物による鉄筋の膨張と摩擦の増大が考えられる。また、図-13 より、NC 供試体ではばらつきが大きいものの、平均付着破壊エネルギーが上昇したのち、徐々に減少していく傾向が確認できる。これは噛み合い効果により付着が増加した後、節の欠損や鉄筋に沿ったひび割れの発生により付着劣化の影響が大きくなり、付着が低下したことを示している。それに対し、SHCC 供試体については平均付着破壊エネルギーが腐食に伴い上昇していることが分かる。SHCC はその高い引張靱性により、ひび割れの発生による拘束力の低下が抑制され、付着抵抗が低下しなかったと考えられる。また、3.2 節に示すような腐食の進行に伴うひび割れの局所化によるひび割れ間隔の増大の影響により、鉄筋の付着長が増えたことも要因として挙げられる。既往の研究<sup>8)</sup>と比較するため断面減少率および単位表面積当たりの腐食量についても関係性を確認した。平均付着破壊エネルギーと断面減少率の関係を図-14 に示すが、断面減少率については、ばらつきが非常に大きく関係性は確認できなかった。また、NC 供試体について既往の研究<sup>9)</sup>では、平均付着破壊エネルギーは鉄筋の断面減少率に依存し、断面減少率の増加に伴って一定値に収束すると報告されているが、そのような傾向は確認できなかった。原因として、本研究に用いた供試体は、通常の両引き試験に用いる供試体と異なり複雑な形状をしていること、および両引き試験において図-15 に示すような変位計付近のひび割れが発生した供試体があり、ひずみの計測に影響を与えたことが挙げられる。これらの点、および架橋力については、溶接鉄筋等の形状の考慮や実験方法などを含めて、さらなる検討が必要である。

#### 4. 結論

鉄筋腐食が SHCC との付着に与える影響を把握するため、電食によって鉄筋を腐食させ、両引き試験を行い、配合、鉄筋の腐食性状、かぶりが鉄筋とコンクリートの付着に与える影響について検討した。その結果、以下のような結果を得た。

- (1) 供試体のかぶりは質量減少率に影響を及ぼすことが示された。
- (2) NC は腐食に伴い鉄筋軸方向にひび割れが発生したのに対し、SHCC は鉄筋軸方向の腐食ひび割れに加え、鉄筋軸方向に直行する腐食ひび割れも多数発生した。
- (3) NC, SHCC とともに腐食の進行に伴い引張りひび割れの本数は減少し、鉄筋の腐食によりひび割れの分散性が悪くなった。
- (4) NC と SHCC では荷重-平均ひずみ曲線に違いが見られ、SHCC は架橋効果により鉄筋降伏後も引張力を負担することが確認された。
- (5) SHCC は引張靱性が高いことから、腐食による付着の低下が抑制され、NC と異なる挙動を示した。

#### 参考文献

- 1) 松尾洋, 五角亘, 下村匠：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001
- 2) 稲熊唯史, 山下賢司, 水田武利, 六郷恵哲：HPFRCC のテンションスティフニング特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 3) 金螢来, 長井宏憲, 野口貴文：両引き試験による鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 4) 鬼塚由佳, 金久保利之：ECC のテンションスティフニング効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 653 号, 2010.7
- 5) 梅原秀哲, 中村光, 内田裕市, 伊藤睦, 木全博聖：コンクリートを学ぶ-構造編-, 柴山斐呂子, 初版, pp.83-96, 2010
- 6) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 伊藤始, 佐藤文則：鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響, 港湾航空技術研究所資料, 1044, 2003
- 7) 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也：鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.2, 1991

#### 謝辞

本研究は JSPS 二国間交流事業共同研究 (JPJSBP 120228807) による。