

# 鉄筋の腐食がコンクリートと SHCC の付着性状に与える影響

維持管理工学研究室 内藤 彩美

## 1. 研究目的と背景

塩害の発生した鉄筋コンクリート構造物の維持管理には、劣化した部材の詳細な挙動の把握が必要であり、鉄筋の腐食性状および付着性状についても把握することが重要である。

一方、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (SHCC) は、擬似ひずみ硬化特性と複数の微細なひび割れが分散発生する特性を有している。その高い物質透過抵抗性から、ひび割れ発生後も鉄筋が腐食しにくく、部材の引張剛性が低下しにくいと考えられる。

本研究では、普通コンクリート (NC) と SHCC を対象に、塩分を作用させた乾湿繰返しにより劣化促進させ、鉄筋腐食性状を評価し、両引き試験を実施する。この結果から腐食の程度の違いが鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響について把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

供試体形状を図-1 に示す。供試体の W/C は 55% とし、両引き試験用に両端に D25 を溶接した D13 を 2 本配筋した。供試体は打設翌日に脱型し、1 ヶ月間の湿布養生を行った。実験要因を表-1 に示す。

### 2.2 劣化促進

養生期間終了後、曲げひび割れを導入するため、ステンレス丸棒とシャコ万力、I 型鋼を用い

て、載荷スパン 500mm で供試体に所定の曲げたわみを与えた (写真-1)。供試体上部中央に口の字型の塩ビ版 (250×90mm) を貯水槽として設置し、劣化促進室にて NaCl 3% 水溶液を用いた乾湿繰返しを行った。促進室を開放した状態で、貯水槽に NaCl 溶液を 2 日間室温で貯留した後、NaCl 溶液を抜き、促進室を閉鎖した状態で 5 日間高温乾燥 (40~50℃) させることを 1 ヶ月もしくは 4 ヶ月繰り返した。

### 2.3 両引き試験

劣化促進終了後、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、両引き試験を行

表-1 実験要因

要因	水準
配合	NC, SHCC
たわみ	0.0mm, 3.0mm, 5.0mm
劣化促進期間	0 ヶ月, 1 ヶ月, 4 ヶ月



写真-1 曲げひび割れを導入した供試体

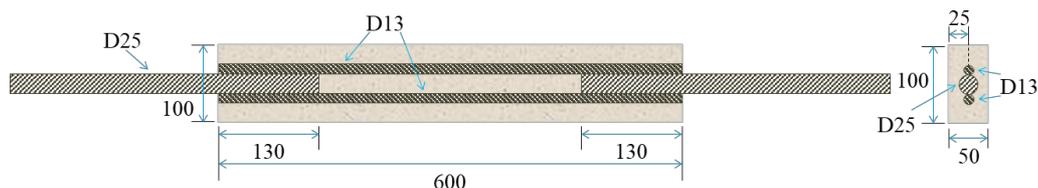


図-1 供試体概要 単位 [mm]

った(図-2)。作用荷重をロードセルで、供試体のコンクリート部全体の伸びを高感度変位計で計測し、伸び10mm程度まで載荷した。また、供試体側面の中央400mmの区間にπ型ゲージ設置し、ひび割れの変位量を計測した。

## 2.4 評価項目

劣化促進期間終了時および両引き試験終了時に、供試体表面のひび割れ状況を記録した。その後、コンクリートカッターを用いて供試体中央の320mmを切り出した上で割裂し、割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧して塩分の侵入範囲を調べた。また、一部の供試体でEPMA分析を行い、塩分浸透状況を確認した。鉄筋をはつり出し、鉄筋の目視観察および腐食面積率、質量減少率を算出した。加えて、3Dスキャナを用いて鉄筋の断面減少を3次元的に確認した。これらの項目と両引き試験の結果から部材の腐食性状および付着性状を評価し、鉄筋の腐食がコンクリートとの付着特性に与える影響について検討を行った。

## 3. 鉄筋腐食性状の評価

### 3.1 塩分浸透状況

図-3に劣化促進を4ヶ月行った後のEPMA分析結果より作成した、浸漬面からの深さ1mmごとの平均塩化物イオン濃度を示す。全般に、浸漬面付近の塩化物イオン濃度が高く、浸漬面から深くなるほど濃度は低下していた。NCでは曲げひび割れにより深さ30mm以深で塩化物イオン濃度が増加していた。ひび割れを通じて塩分が深部にまで浸透し、濃縮したと推察される。一方、SHCCでは曲げひび割れにより塩化物イオン濃度に大きな差が表れた。曲げひび割れと腐食ひび割れから塩分が浸透したため、高濃度になったと考えられる。

### 3.2 鉄筋の腐食面積率と質量減少率の関係

鉄筋の腐食面積率と質量減少率の関係を図-4に示す。なお、劣化促進期間の異なる同一条件の供試体のデータを直線で結んでいる。NCでは劣化促進期間1ヶ月の段階で腐食面積率が急増し、その後、質量減少率が急増していた。NCはSHCCに比べてひび割れに起因する付着破壊領域が広域となるため、鉄筋に沿って劣化

因子が侵入しやすく、腐食面積が拡大したと考えられる。一方、SHCCでは劣化促進期間1ヶ月の段階で質量減少率が増大し、その後、腐食面積率が増大していた。SHCCは発生したひび割れ本数は多いものの、その緻密な構造により付着破壊領域が狭域となるため、劣化因子が供給される範囲が限定的で、ひび割れ部での腐食が進行したと推察される。その後、腐食ひび割れの発生に伴い腐食領域が拡大したと考えられる。

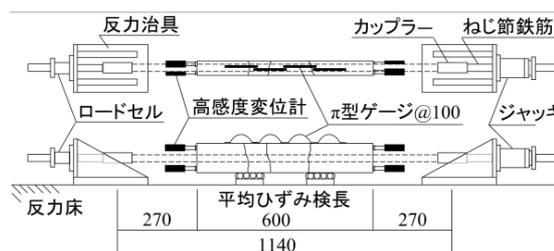
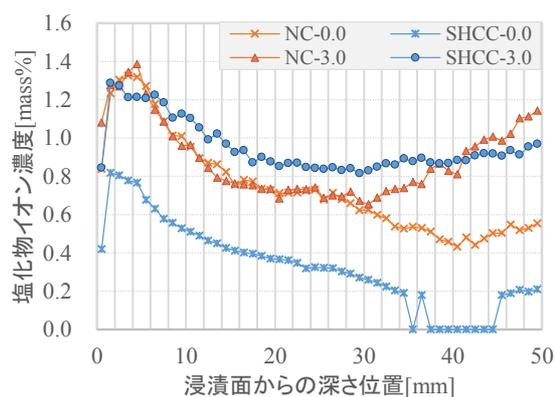
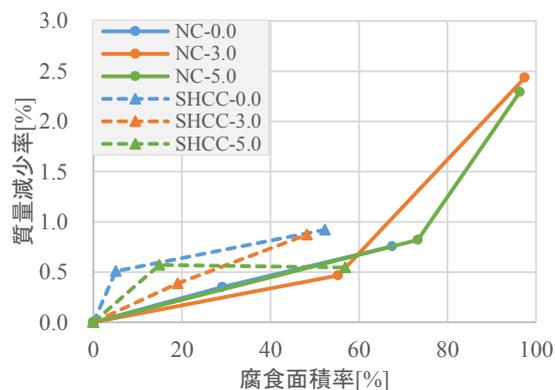


図-2 両引き試験状況



※供試体名：配合一たわみ[mm]

図-3 塩化物イオン濃度分布



※供試体名：配合一たわみ[mm]

図-4 腐食面積率と質量減少率の関係

### 3.3 鉄筋腐食分布とひび割れの関係

図-5 に塩分浸漬させた部分の鉄筋腐食の様子とひび割れ位置の対応例を、図-6 に鉄筋断面積とひび割れ位置の対応例を示す。全般に、曲げひび割れ発生位置付近で鉄筋が腐食しており、断面積が減少していた。また、劣化促進期間が長くなるほど腐食範囲が拡大しており、曲げひび割れおよび劣化促進期間は鉄筋腐食に影響を及ぼすといえる。NC と SHCC で比較すると、腐食程度の差が明瞭であった。SHCC のもつ高い物質透過抵抗性により、NC よりも腐食が進行しなかったと考えられる。

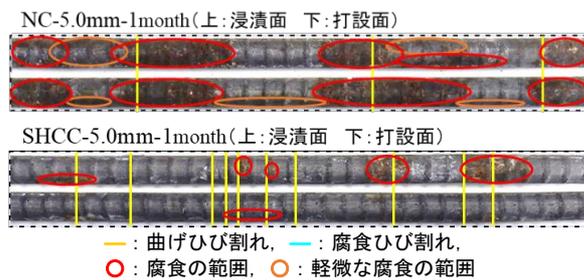


図-5 鉄筋腐食の様子とひび割れ位置の例

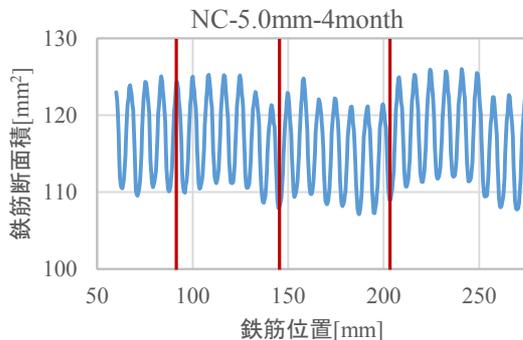


図-6 鉄筋断面積とひび割れ位置の例

## 4. 鉄筋コンクリートの付着性状の評価

### 4.1 ひび割れ状況（両引き試験終了時）

図-7 に両引き試験後のひび割れ状況の例を示す。NC では事前にたわみを与えた供試体で軸方向にひび割れが発生し、コンクリートの浮き・剥落を確認した。鉄筋腐食により鉄筋とコンクリート間の付着が切れ、軸方向ひび割れが発生したと考えられる。一方、SHCC では鉄筋腐食の程度によるひび割れ状況の違いは認められなかった。

### 4.2 ひび割れ分散性

健全な供試体に生じた平均引張ひび割れ本数  $N_{0,av}$  に対する腐食した供試体に生じた平均ひび割れ本数  $N_{cor,n}$  の比をひび割れ分散性  $N_{cor,n}/N_{0,av}$  とし、図-8 に鉄筋の質量減少率とひび割れ分散性の関係を示す。NC では、たわみおよび劣化促進期間の増大に伴ってひび割れ分散性は低下しており、曲げひび割れや劣化促進期間はひび割れ分散性に影響を及ぼすことが示された。付着力の喪失により、引張力が伝達されず引張割れ間隔が大きくなったと考えられる。一方、SHCC では全般にひび割れ分散性は1を下回っていたが、質量減少率との関係性は認められなかった。腐食していない健全部から伝達された引張力が、繊維によって供試体の広範囲へ伝達された可能性がある。

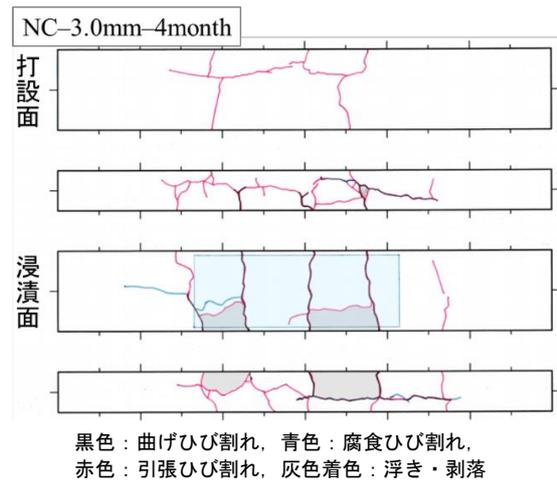
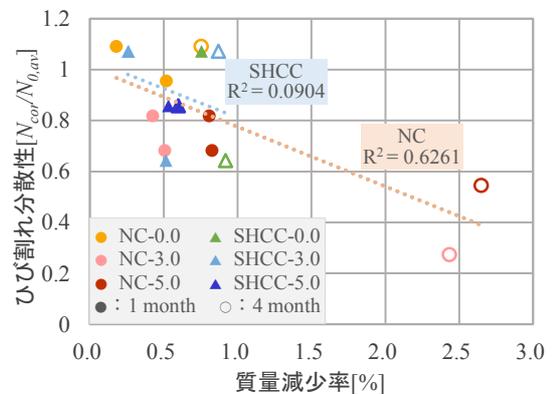


図-7 両引き試験後のひび割れ状況の例

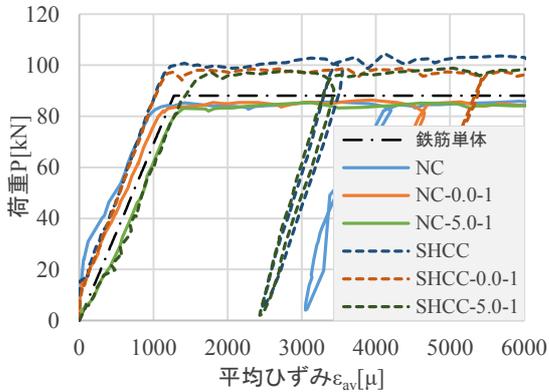


※供試体名：配合一たわみ[mm]

図-8 両引き試験後のひび割れ状況の例

### 4.3 両引き試験結果

両引き試験で得られた荷重－平均ひずみ曲線を図-9に示す。NC、SHCCともに事前に与えたたわみが増大するほど、同一平均ひずみにおける荷重が小さい傾向となった。一方、劣化促進期間の1ヶ月と4ヶ月の差は認められなかった。SHCCでは鉄筋単体よりも大きい降伏荷重を示しており、部材の引張剛性がNCよりも高いことが示された。なお、鉄筋降伏前の荷重が鉄筋単体よりも小さい値となったのは、供試体形状が複雑なために鉄筋量を正確に考慮できていないことが原因と推察される。

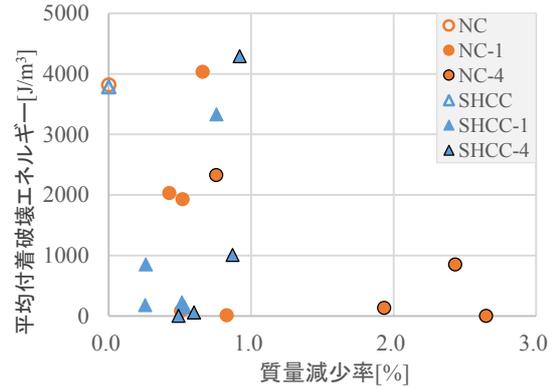


※供試体名：配合－たわみ[mm]－劣化促進期間[month]

図-9 質量減少率とひび割れ分散性の関係

### 4.4 腐食性状と付着性状の関係

図-9の鉄筋降伏以前における、供試体と鉄筋単体の荷重－平均ひずみ曲線に囲まれた部分の面積を平均付着破壊エネルギーとし、図-10に鉄筋の質量減少率と平均付着破壊エネルギーの関係を示す。NC、SHCCともに劣化促進によって平均付着破壊エネルギーが減少することを確認した。さらに、NCでは質量減少率の増大に伴って平均付着破壊エネルギーが減少する傾向を示しており、鉄筋の腐食により付着力が失われることが示された。一方、SHCCでは、多数の微細なひび割れに起因する複雑なひずみ（応力）分布のために、本研究の手法では供試体のひずみを正確に考慮できていない可能性があるため、今後、検討が必要である。



※供試体名：配合－たわみ[mm]－劣化促進期間[month]

図-10 質量減少率とひび割れ分散性の関係

## 5. まとめ

### 5.1 鉄筋の腐食性状

- (1) 部材に導入した曲げひび割れと劣化促進期間は塩分浸透に影響を及ぼし、NCとSHCCで浸透過程が異なることが示された。
- (2) NCとSHCCでは物性の違いにより、鉄筋腐食の進行過程に違いが認められ、SHCCの高い防食性能を確認した。
- (3) 鉄筋の腐食位置と断面減少は、部材に導入した曲げひび割れと劣化促進期間の影響を受けていた。

### 5.2 鉄筋コンクリートの付着性状

- (1) 両引き試験においてNCでは鉄筋コンクリートの付着切れに起因する軸方向ひび割れの発生を確認した。
- (2) NC、SHCCともにひび割れ分散性の低下が認められ、特に、NCでは鉄筋の腐食程度に影響されていた。
- (3) 全般にたわみが増大するほどテンションステイフニング効果が減少していた。SHCCは鉄筋降伏後も引張力を分担していた。
- (4) NCでは、平均付着破壊エネルギーを用いて腐食性状と付着性状の関係性を評価することができた。

### 参考文献

加藤絵万, 他: 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, 港湾空港技術研究所 資料, 1044, 2003