

# SHCCの鉄筋付着性状および自己治癒性能に関する研究

維持管理工学研究室 中村 俊介

## 1. はじめに

多くのインフラの劣化に伴い、維持管理費は増大傾向にあり、今後新たに造られる構造物にはライフサイクルコストの削減が求められており、構造物の長寿命化は取り組むべき課題である。また、近年では、ポゾラン反応性を有するフライアッシュや潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末のセメント混和材の利用が、資源の有効利用という観点から拡大しているが、これらの反応はポルトランドセメントと比較すると、長期にわたるのが特徴である。

コンクリート中の鉄筋腐食は鉄筋コンクリート（RC）構造物の代表的な劣化形態の一つである。鉄筋の腐食に伴うひび割れの発生や鉄筋の断面減少によってRC構造物の性能が低下する。さらに、ひび割れを通じて劣化因子が構造物内へ侵入し、腐食は加速する。腐食したRC構造物の維持管理には、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。

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）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が、そのようなひび割れも劣化の起点となることが指摘されている。

本研究では、SHCCの腐食鉄筋との付着性状および自己治癒性能について評価を行うこととした。鉄筋付着性状に関しては、普通コンクリート（NC）とSHCCの鉄筋コンクリート部材を対象に、鉄筋の腐食程度の違いが鉄筋とコンクリートの付着性能に及ぼす影響について実験的に検討することとした。鉄筋を電食により腐食させ、

かぶり、および、腐食程度を要因とし、一軸引張荷重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、NCとSHCCの違い、および腐食状況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。

自己治癒性能に関しては、フライアッシュおよび高炉スラグを混和したNCとSHCCの鉄筋コンクリート部材を対象に、一軸引張によりひび割れを導入し、湿布養生を行い、その前後に簡易的な透水試験を実施することで自己治癒性能評価を行うこととした。なお、既存のRC構造物を想定し、ひび割れ導入後、2ヶ月間気中養生を行った後、修復養生を行った。

## 2. SHCCの腐食鉄筋との付着性状の評価

### 2.1 実験概要

#### 2.1.1 供試体概要

供試体形状を図-1に示す。かぶりは20mm、30mm、40mmの3種類とした。供試体のW/Cは40%とし、NCとSHCCを用いた供試体をそれぞれ作成した。繊維はPE繊維を用い、繊維混入率を体積比で1.2%とした。供試体内にD13（SD295）を2本配置したが、その両端には両引き試験用にD25が溶接してある。供試体は打設翌日に脱型し、28日間の湿布養生を行った。実験要因を表-1に示す。

表-1 実験要因

要因	水準
マトリックス	普通コンクリート、SHCC
W/C	40%
かぶり	約20mm、約30mm、約40mm
劣化程度	0（＝劣化なし）、小、中、大

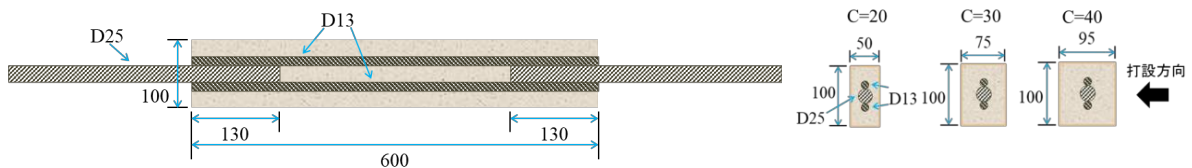


図-1 供試体概要

単位 [mm]

## 2.1.2 電食による鉄筋の腐食促進

養生期間終了後、供試体に対して電食を行った。打設時の底面を上面とし、その中央に口の字型の塩ビ版(250×90mm)を貯水槽として設置し、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。

### 2.1.3 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。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。

### 2.1.4 腐食状況の評価

電食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、鉄筋をはつり出し、鉄筋腐食面積率、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。

## 2.2 鉄筋腐食性状

### 2.2.1 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-2に示す。なお、各2体作製した供試体の平均を、同一マトリックス、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。

### 2.2.2 ひび割れ状況

図-3にSHCC供試体の荷重ひび割れの例を示す。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。各健全供試体に生じた引張ひび割れ本数の平均 $N_{0,av}$ に対する、各劣化供試体に生じた引張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>2)</sup>、ひび割れ分散性と腐食面積率の関係を図-4に示す。NC供試体、SHCC供試体ともに、劣化の進展に伴って引張ひび割れ

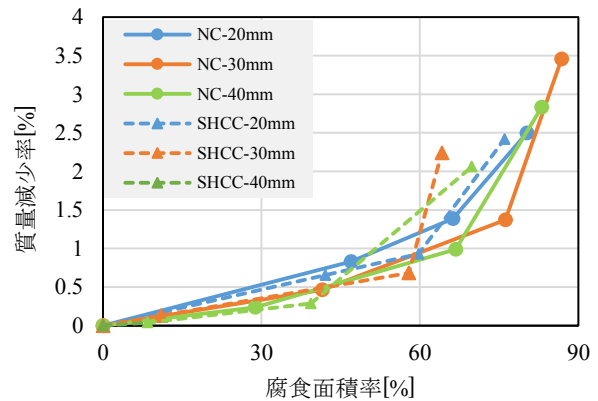
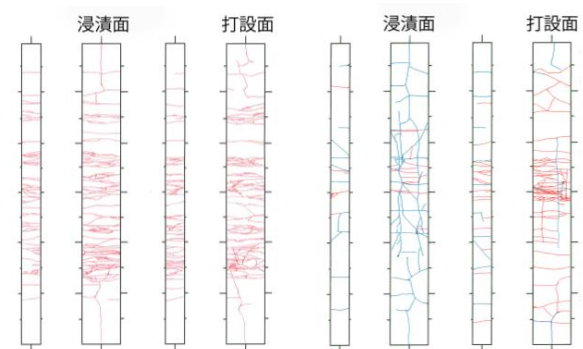


図-2 腐食面積率と質量減少率の関係



(a) 腐食なし

(b) 劣化程度大

図-3 SHCC 供試体ひび割れ図(C=20mm)

(青色：電食終了後、赤色：両引き試験終了後)

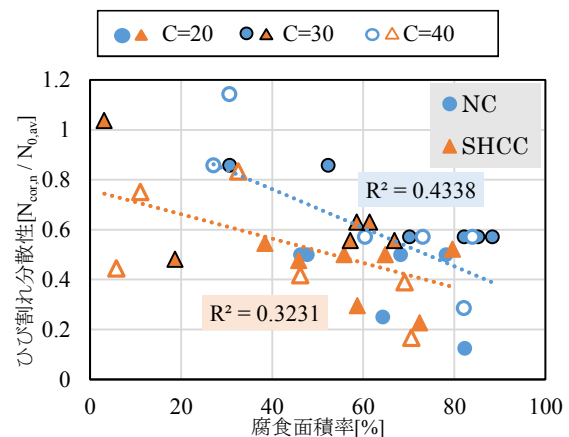


図-4 ひび割れ分散性と腐食面積率の関係

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。

### 2.3 コンクリートとSHCCの引張剛性

図-5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積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

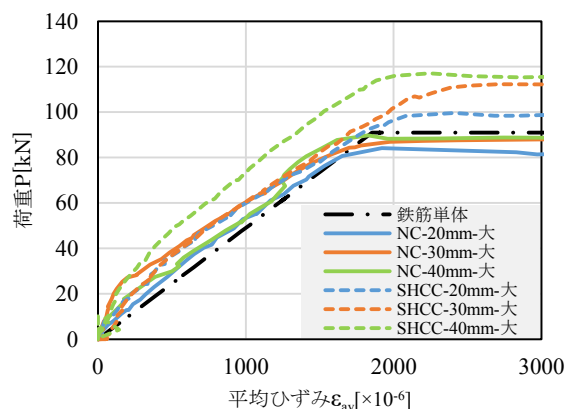
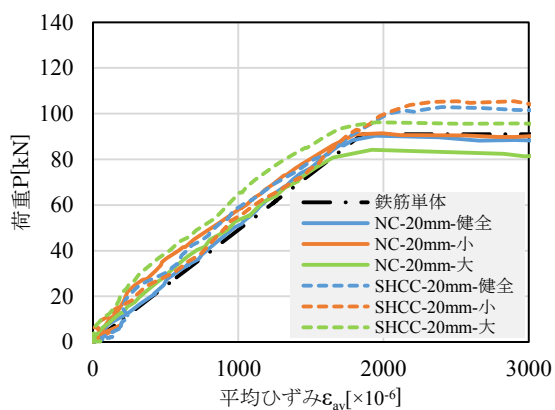


図-5 荷重—平均ひずみ関係

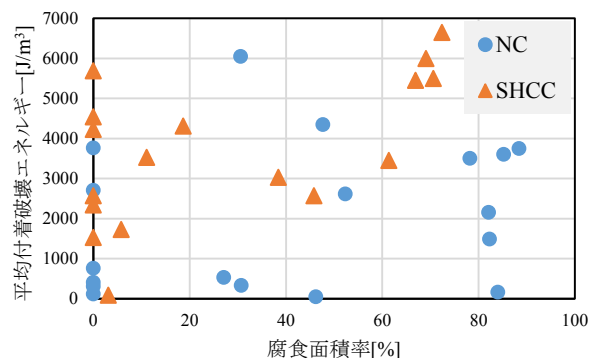


図-6 平均付着破壊エネルギーと腐食面積率の関係

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。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 供試体ではかぶり大きいほど降伏荷重が大きくなった。かぶり大きいほど 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-5 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-6 に鉄筋の腐食面積率と平均付着破壊エネルギーの関係を示す。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、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。

### 3. SHCC の自己治癒性能の評価

#### 3.1 実験概要

##### 3.1.1 供試体概要

供試体形状、寸法は 2.1.1 節におけるかぶり 20mm のものと同様の形状とした。供試体は打設後 1 日で脱型し、20°C に設定された養生室で、湿布で供試体を被覆することによって 1 ヶ月間湿布養生を行った。

##### 3.1.2 実験手順

NC 供試体と混和材なし (OPC) の SHCC 供試体については各 1 体、混和材あり (FA, SG) の SHCC 供試体については各 2 体、合計 21 体作製した。なお、NC 供試体については、混和材なしの供試体は作製していない。試験の流れを図-7 に示す。既存の RC 構造物を想定し、ひび割れ導入後、2 ヶ月間気中養生した後、修復養生として 1 ヶ月間湿布養生を行い、この間に透水試験を実施した。

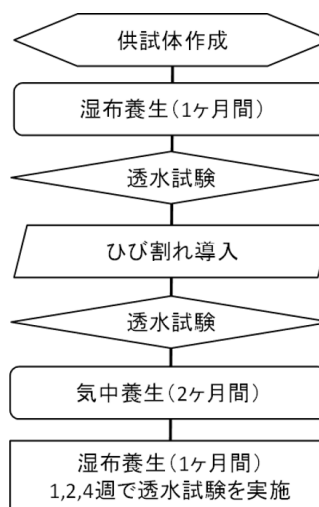


図-7 試験の流れ

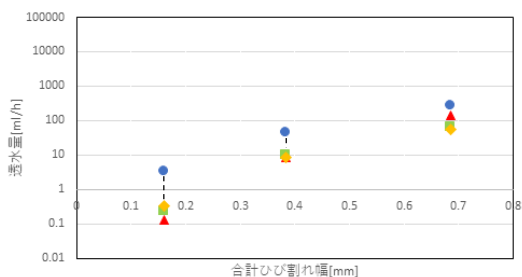


図-8 ひび割れ導入後の養生期間が透水量に与える影響 (OPC 供試体)

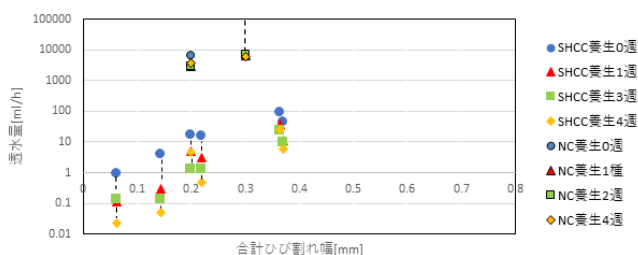


図-9 ひび割れ導入後の養生期間が透水量に与える影響 (FA 供試体)

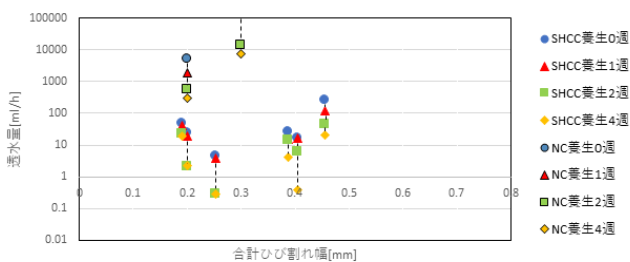


図-10 ひび割れ導入後の養生期間が透水量に与える影響 (SG 供試体)

### 3.3 自己治癒の影響

図-8~10 にマトリックスの配合毎の透水試験の結果を示す。なお、NC 供試体は記号を黒でふち取りしている。どの供試体においても、時間の経過に伴う透水量の減少が確認できた。OPC 供試体、および FA 供試体において合計ひび割れ幅が小さいほど透水量の減少が大きくなる傾向が確認でき、特に FA 供試体において顕著に見られた。微細なひび割れが多かったため、ひび割れが閉塞しやすかったと考えられる。それに対し、SG 供試体は合計ひび割れ幅と透水量の減少に明確な関係は確認できなかった。

SHCC 供試体と NC 供試体を比較すると、NC 供試体は修復養生を行っても透水量があまり減少していないことが確認できる。NC 供試体は一本の大きなひび割れが導入されているため、自己治癒物質がひび割れを充填するほど生成されなかったと考えられる。

OPC 供試体、および FA 供試体は修復養生 1 週で透水量が急激に減少した後、透水量はほぼ一定となっているのに対し、SG 供試体は透水量の減少のタイミングが一樣ではないことが確認できる。SG 供試体はマトリックスの違いから、OPC 供試体や FA 供試体よりも緩やかに自己治癒物質の析出が進んでいるものと考えられる。

## 4. 結論

鉄筋の腐食が鉄筋と SHCC との付着性能に及ぼす影響について検討を行うため、配合、かぶり、劣化程度に違いを設け、両引き供試体を作製した。電食により鉄筋を腐食させた状態で、両引き試験を行い、鉄筋の腐食性状、鉄筋とコンクリートの付着性状について評価を行った。また、フライアッシュおよび高炉スラグを混和した NC と SHCC の鉄筋コンクリート部材を対象に、一軸引張によりひび割れを導入し、湿布養生を行い、その前後に簡易的な透水試験を実施することで自己治癒性能評価を行った。その結果、以下のような結果を得た。

### ・ SHCC の腐食鉄筋との付着性状の評価

- (1) 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。
- (2) NC, SHCC とともに腐食の進行に伴い引張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。
- (3) SHCC は引張弾性が高いことから、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。

### ・ SHCC の自己治癒性能の評価

- (1) NC 供試体と比較すると、SHCC 供試体はその複数の微細なひび割れという特徴から、透水量は極めて小さい値を示し、透水量の低下も大きくなった。
- (2) SHCC 供試体において、SG 供試体はひび割れのばらつきが大きくなった。
- (3) マトリックスの配合の違いから、透水量が急激に減少するタイミングは異なることが確認された。

## 参考文献

- 1) K.Kobayashi, SC Paul, GPAG van Zijl: Reinforcing Bar Corrosion, A Framework for Durability Design with SHCC, Springer, pp147-170,2017.
- 2) 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
- 3) 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