

# 曲げひび割れを導入した応力作用下にある SHCC 内の鉄筋の腐食

維持管理工学研究室 細川 航己

## 1. はじめに

これまで一軸引張ひび割れを有する SHCC の鉄筋防食性能が優れていることが明らかとなっている。一方、一般のコンクリートは引張応力作用下では拡散係数が増大することがよく知られているが、SHCC はその疑似ひずみ硬化特性に期待して引張応力下で使用されることが多くなるものと考えられる。そこで本研究の前半では、W/C、塩分作用時の引張応力作用の有無等を要因に、配筋された SHCC 部材を対象に塩化物水溶液による乾湿繰返し試験を行い、塩分の浸透深さと濃度、鉄筋腐食面積率、鉄筋質量減少率の測定を行った。

また、劣化因子の 1 つである塩分のコンクリート中への浸透過程については、海岸での曝露試験や塩水噴霧による乾湿繰返しを用いた研究などが多数行われてきたが、鉄筋の腐食には塩分だけではなく酸素と水も腐食反応に必要である。しかし、これまで複数ある鉄筋の劣化因子の中で、各々がどのようにどの程度影響しているのか明らかにされているとは言いがたく、不明な点が多い。よって、研究の後半では、劣化因子の 1 つである塩分はコンクリート練混ぜ時にあらかじめ与え、その鉄筋腐食に及ぼす影響は一定としたうえで、酸素と水の供給状況を変えるため、コンクリートの W/C、曲げひび割れ幅を要因とした実験を行い、これらが鉄筋腐食の分布や進行に与える影響について比較、検討を行った。

これらの 2 つの研究の結果を用いてひび割れを有した SHCC の補修材としての性能を明らかにすることを本研究の最終的な目的とする。

## 2. 外来塩分に対する SHCC の鉄筋防食性能

### 2.1 供試体概要

それぞれ W/C が 0.3 と 0.4 の PE-0 と PE-25 という配合名の SHCC 配合を用いた。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 1600N/mm<sup>2</sup>）を用いた。また供試体形状、寸法を図-1 に示す。

D10 鉄筋のかぶりを 20mm とした供試体は SHCC の打ち込みの翌日に脱型した。脱型後、20 $^{\circ}$ C の養生室で 28 日間湿布養生を行った。また、ブリーディングによる鉄筋下面への滞水や断面内の上下で実質の W/C が異なることの影響を調査するために、各配合に一体ずつ、かぶりの大きさはそのまま上下を入れ替えて作製した供試体も準備した（以後、逆方向打設供試体と称す）。

実験要因を表-2 に示す。

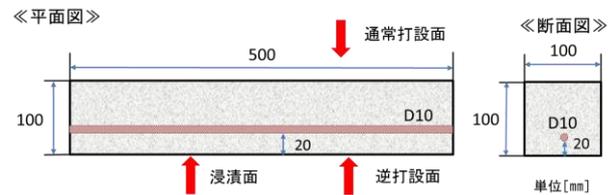


図-1 供試体形状、寸法（単位：mm）

表-1 実験要因

ひび割れタイプ	曲げ荷重の持続作用下でのひび割れ、除荷後の残留ひび割れ
たわみ	0mm, 0.8mm, 1.2mm
打設方向	順方向, 逆方向
水セメント比	30%, 40%
劣化促進期間	1ヶ月, 3ヶ月, 1年

## 2.2 乾湿繰返し試験

### (1) 持続荷重供試体

養生終了後、載荷スパン 400mm の一点集中曲げ載荷にてひび割れ導入を行った。表-1 に示した所定のたわみに達した時点で載荷を終了し、一旦除荷した。その供試体を I 型鋼上に設置し、ボルトを締めることにより、供試体に再度所定のたわみを生じさせ、曲げひび割れを再び開口させた。その状態の供試体上部に口の字型（250 $\times$ 90mm）に組み立てた塩ビ板をシリコンシールで接着することで貯水槽とした。20 $^{\circ}$ C の養生室内で、貯水槽に濃度 3% の NaCl 水溶液を 3 日間溜め、NaCl 水溶液を抜いて 4 日間乾燥させる乾湿繰返し試験を所定の期間行った。

### (2) 残留ひび割れ供試体

持続荷重供試体と同様に載荷スパン 400mm の一点集中曲げ載荷にてひび割れ導入を行った。残留ひび割れ供試体では、一旦たわみが所定の値より大きくなるように荷重を加え、除荷した後に塑性変形により目標とする大きさ（表-1）のたわみが残留するよう調整した。残留ひび割れ供試体も供試体上部に口の字型（250 $\times$ 90mm）に組み立てた塩ビ板をシリコンシールで接着することで貯水槽とした。乾湿繰返し試験の条件は持続荷重供試体と同様である。

### (3) 測定項目

所定の劣化促進期間終了後、500mm の供試体を 150+200+150mm にコンクリートカッターを用いて切断し、中央の 200mm の供試体を鉄筋に平行に割裂した。

割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧し、最大浸透深さ、鉄筋位置での供試体軸方向への浸透幅を測定した。その後、ひび割れ発生位置にて深さ 40mm まで 10mm 毎の試料採取を行い、塩化物イオン量を分析した。割裂した供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率、質量減少率を算出した。また、3D スキャナを用い、鉄筋の断面減少状況を確認し、これら評価項目からひび割れ導入方法やひび割れ発生位置が鉄筋腐食、分布に与える影響について検討を行った。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 塩分浸透状況

最大塩分浸透深さの例をたわみ別に図-2 に示す。なお、ほとんどの供試体で曲げモーメントの大きい供試体中央付近において浸透深さが最大となった。残留ひび割れ供試体では、劣化促進期間の延長にともない最大浸透深さが大きくなっていく傾向にあった。

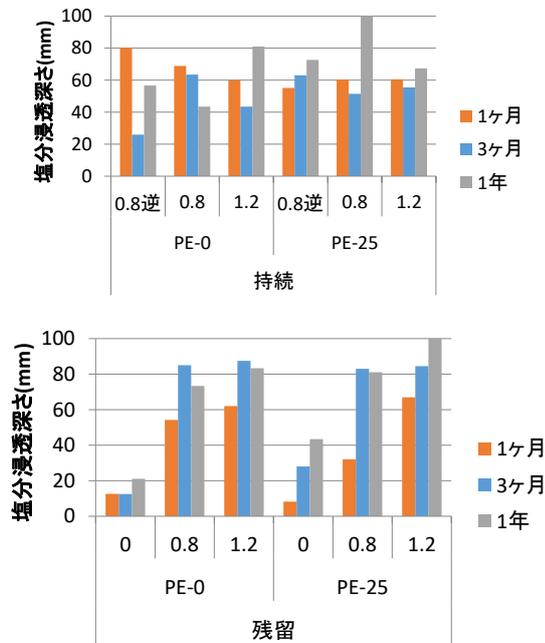


図-2 最大塩分浸透深さ (mm)

(上/持続荷重供試体, 下/残留ひび割れ供試体)

### 2.3.2 鉄筋腐食に与える影響

#### (1) 鉄筋腐食分布とひび割れの関係

鉄筋の腐食状況とひび割れ位置の例を図-3 に示す。いずれの劣化促進期間でも、持続荷重供試体ではひび割れの近くで腐食が発生しているのだが、ひび割れは広範囲に分布しているため、図上の 2 枚の写真に示すように、腐食も広範囲に分布しているものが多かった。一方、残留ひび割れ供試体でもひび割れは広範囲に分布しているのだが、図下の 2 枚の写真に示すように、腐食は集中して発生しているものが多かった。残留ひび割れ供試体は、鉄筋との付着破壊が生じた領域が広

い可能性がある。そのため、マクロセル腐食的に腐食が集中したためと考えられる。

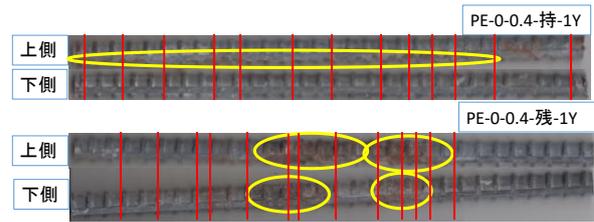


図-3 鉄筋の腐食状況とひび割れ位置の例 (—: ひび割れ位置, ○: 腐食の範囲)

(上/持続荷重供試体—試験期間 1 年, 下/残留ひび割れ供試体—試験期間 1 年)

#### (2) 鉄筋の質量減少率

鉄筋の質量減少率の例を図-4 に示す。持続荷重供試体よりも残留ひび割れ供試体において、劣化促進期間が長くなることに伴う質量減少率の増加が大きかった。なお、試験期間 1 か月と 3 か月では表面錆しか確認できなかったが、試験期間 1 年の PE-0, PE-25 のたわみ 1.2mm の残留ひび割れ供試体で、鉄筋の腐食部分に欠損が見られた。

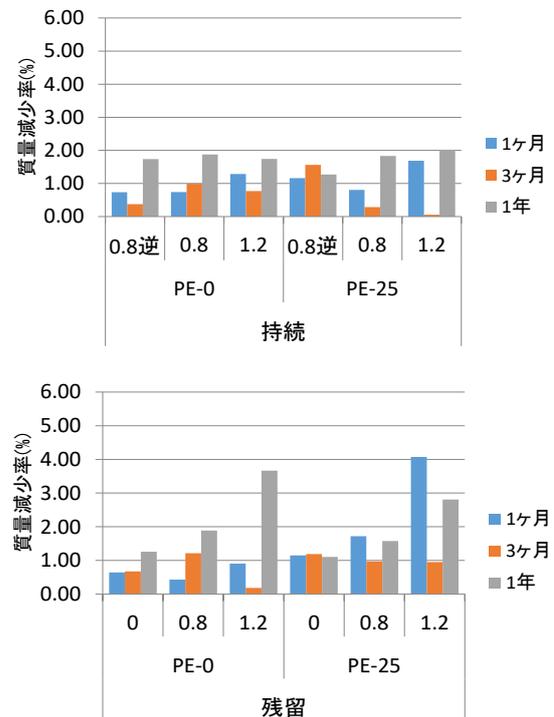


図-4 質量減少率 (上/持続荷重供試体, 下/残留ひび割れ供試体)

#### (3) 断面減少とひび割れの関係

レーザー式 3D スキャナで得たデータから解析した鉄筋の断面性状の例を図-5 に示す。本研究で用いた異形 D10 鉄筋の公称断面積は  $71.33\text{mm}^2$  である。

全体的な傾向としては、ひび割れ位置と断面減少が確認される位置については、ある程度の相関性がみられた。また、ひび割れ導入方法の違いで比較をすると、残留ひび割れ供試体の方が顕著な断面減少が認められ、かつ、より深い鉄筋腐食（マクロセル腐食）が生じている傾向にある。一方、持続荷重供試体では、残留ひび割れ供試体に比べて広い範囲で浅い鉄筋腐食（マイクロセル腐食）が生じている。

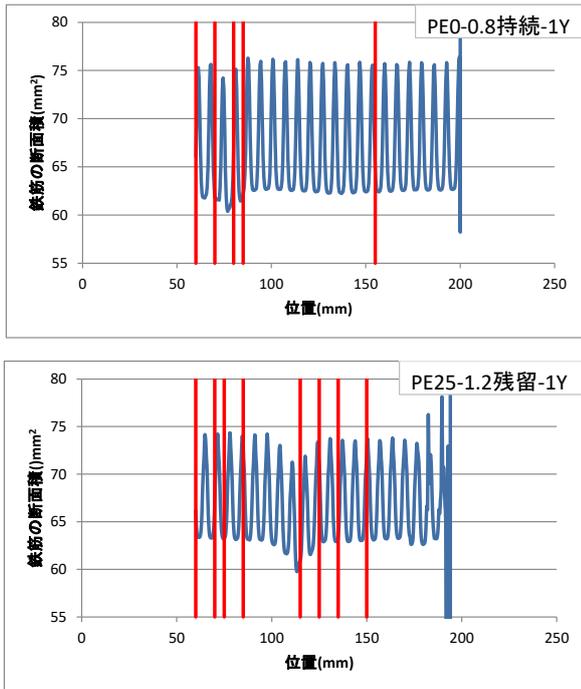


図-5 鉄筋の断面積とひび割れ発生位置の例（-：ひび割れ位置）  
（上/持続荷重供試体，下/残留ひび割れ供試体-試験期間1年）

### 第3章 内在塩分に対するSHCCの鉄筋防食性能

#### 3.1 実験概要

W/Cが0.4と0.55の配合を用いた。使用材料は、2章と同じである。また、本章の実験では、いずれの配合にも鉄筋を腐食させるのに十分な $8.24\text{kg/m}^3$ のNaClをあらかじめコンクリートに混入した。

供試体形状、寸法は図-2.1と同様である。供試体はSHCCの打ち込みの翌日に脱型した。脱型後、 $20^\circ\text{C}$ の養生室で28日間湿布養生を行った。実験要因を表-3.2に示す。

また、持続加重供試体と残留ひび割れ供試体の定義は、第2章と同じである。その後、劣化促進室にて供試体を温度 $35\sim 40^\circ\text{C}$ 、湿度100%環境に7日間曝露した後、促進室を開放して7日間乾燥させる乾湿繰返しによる劣化促進を行った。また、各試験の測定項目は、2章と同じである。

表-2 実験要因

ひび割れタイプ	曲げ荷重の持続作用下でのひび割れ，除荷後の残留ひび割れ
たわみ	0mm, 0.8mm, 1.2mm
水セメント比	40%, 55%
劣化促進期間	3ヶ月, 1年

#### 3.3 鉄筋腐食状況の評価

##### (1) 鉄筋腐食面積率

劣化促進期間3か月の供試体の鉄筋の腐食面積率の例を図-6に示す。持続荷重供試体の高水セメント比のものが最も大きい数値となった。また、残留ひび割れ供試体のほうが、たわみの大きさによる腐食面積率の差が大きい結果となった。これは、残留ひび割れ供試体には一旦大きなたわみが与えられているため、繊維周囲の付着破壊領域が広範になり、そこに劣化因子が集積されたものと考えられる。

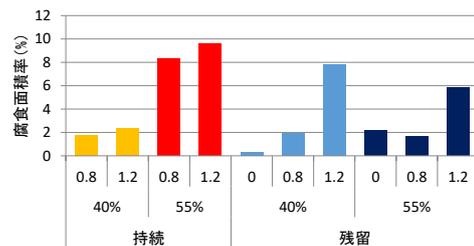


図-6 腐食面積率

##### (2) 鉄筋の質量減少率

劣化促進期間3か月の供試体の鉄筋の質量減少率の例を図-7に示す。全体的な傾向として、水セメント比が高いほうが、また、与えたたわみが大きいほうが質量減少率が大きかった。2章に示す外来塩分の場合と同様に、質量の減少が少ない。あらかじめ塩分を加えていたことから、腐食面積同様に、数値も大きくなることを予想していたが、内在塩分の場合でも、劣化促進期間3か月だと、ほとんどが表面錆のみで質量の減少に影響が少ないことが分かった。

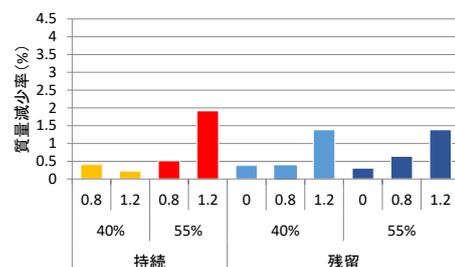


図-7 質量減少率

### (3) 鉄筋腐食分布とひび割れの関係

鉄筋の腐食状況とひび割れ位置の例を図-8 に示す。図上の 2 枚の図に示すように、持続荷重供試体ではひび割れ位置だけでなく、腐食も広範囲に分布しているものが多かった。一方、残留ひび割れ供試体では、図下の 2 枚の写真に示すように、腐食は集中して発生しているものが多かった。内在塩分の場合、劣化因子がすでに鉄筋近傍に存在していることから引張りひずみの影響を受けやすかったのではないかと考えられる。

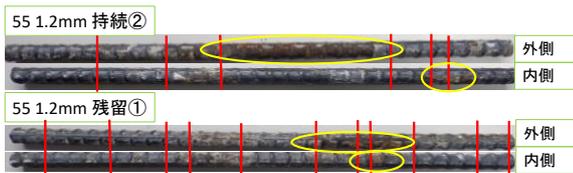


図-8 鉄筋の腐食状況とひび割れ位置の例（—：ひび割れ位置，○：腐食の範囲）  
（上/持続荷重供試体—試験期間 3 か月，下/残留ひび割れ供試体—試験期間 3 か月）

### (4) 断面減少とひび割れの関係

レーザー式 3D スキャナで得たデータから解析した鉄筋の断面性状の例を図-9 に示す。

全体的な傾向としては、ひび割れ位置と断面減少が確認される位置については、ある程度の相関性がみられた。また、ひび割れ導入方法の違いで比較をすると、2 章での結果と同様に残留ひび割れ供試体の方が顕著な断面減少が認められ、かつ、より深い鉄筋腐食（マクロセル腐食）が生じている傾向にある。一方、持続荷重供試体では、残留ひび割れ供試体に比べて広い範囲である程度の鉄筋腐食（ミクロセル腐食）が生じていると考えられる。

また、練り混ぜ時から鉄筋の腐食に十分な量の塩分を与えていることから、2 章に示す外来塩分の場合よりも、劣化促進期間 3 か月において、鉄筋の腐食はより進行していた。

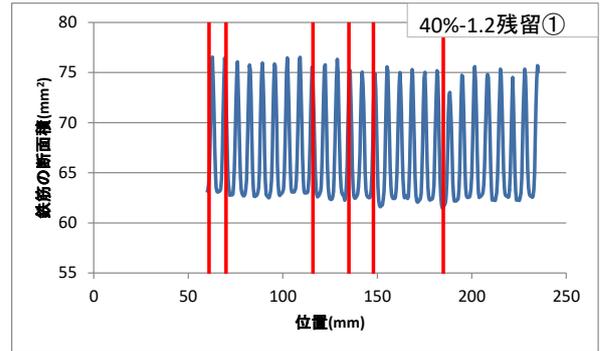
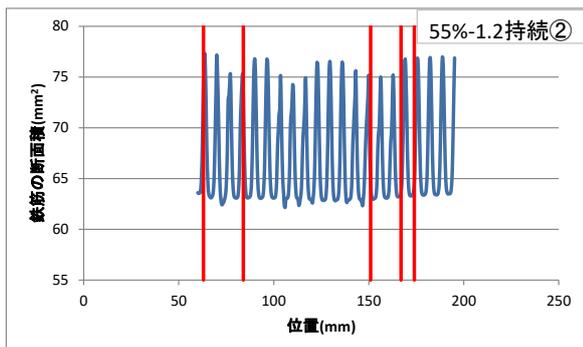


図-9 鉄筋の断面積とひび割れ発生位置の例（—：ひび割れ位置）  
（上/持続荷重供試体，下/残留ひび割れ供試体—試験期間 3 か月）

## 第 4 章 結論

### 4.1 外来塩分に対する SHCC の鉄筋防食性能

- 1) 試験期間が長くなることで、ひび割れ導入方法による塩分浸透量の差が見られた。残留ひび割れ供試体のほうが塩分量の増加が大きかった。
- 2) 持続荷重供試体は、広範囲に腐食している供試体が多かった。また、残留ひび割れ供試体では、一箇所に集中した腐食のある供試体が多く、比較的ひび割れ幅の大きい位置にのみ集中した腐食が見られた。
- 3) 残留ひび割れ供試体の方が顕著な断面減少が認められ、かつ、より深い鉄筋腐食（マクロセル腐食）が生じている傾向にある。一方、持続荷重供試体では、残留ひび割れ供試体に比べて広い範囲である程度の鉄筋腐食（ミクロセル腐食）が生じていると考えられる。

### 4.2 内在塩分に対する SHCC の鉄筋防食性能

- 1) 持続加重供試体よりも残留ひび割れ供試体のほうが、たわみの大きさによる腐食面積率の差が大きい結果となった。これは、残留ひび割れ供試体には一旦大きなたわみが与えられているため、繊維周囲の付着破壊領域が広範になり、そこに劣化因子が集積されたものと考えられる。
- 2) 持続荷重供試体ではひび割れ位置だけでなく、腐食も広範囲に分布しているものが多かった。一方、残留ひび割れ供試体では、腐食は集中して発生しているものが多かった。内在塩分の場合、劣化因子がすでに鉄筋近傍に存在していることから引張りひずみの影響を受けやすかったのではないかと考えられる。