

論文 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

細川 航己^{*1}・小林 孝一^{*2}

要旨：配筋された SHCC はり部材に、持続荷重により生じている曲げひび割れ、あるいは、徐荷後に残留している曲げひび割れを導入したうえで、塩化物を用いた乾湿繰返し試験を行い、それらひび割れが鉄筋腐食に与える影響を検討した。残留ひび割れ供試体は鉄筋腐食が局所化する傾向を示し、試験期間が長くなるにつれ腐食面積率、質量減少率が大きくなった。一方、持続荷重供試体は広範囲で薄く腐食が進み、試験期間が長くなっても腐食面積率、質量減少率の増加は比較的小さかった。また、逆方向打設を行った供試体では、どの試験期間でも塩分量が最も大きい結果となったが、鉄筋腐食との相関性は低かった。

キーワード：SHCC、かぶり、曲げひび割れ、持続荷重、残留ひび割れ、塩害、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、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、引張あるいは曲げ応力下において、初期ひび割れ発生後、ひずみの増加に伴い応力が増加する疑似ひずみ硬化特性と、複数の微細なひび割れが分散して発生するという特性を示す材料である。通常、SHCC は使用状態において、混入する繊維に高強度ポリエチレン（以下 PE）繊維を用いた場合で幅 0.02mm 程度以下、ポリビニルアルコール（PVA）繊維を用いた場合でも 0.04mm 程度以下の微細ひび割れを形成する。ひび割れが非常に微細であることから物質透過抵抗性が高く¹⁾、劣化が生じたコンクリート構造物の補修材として適用され始めている。

これまで著者等は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を明らかにしてきた²⁻⁴⁾。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。

そこで本研究では、W/C、塩分作用時の引張応力発生の有無等を要因に、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。それら結果からひび割れを有した 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目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

SHCC の配合を表-1 に示す。W/C が 0.3 と 0.4 の配合を用いた。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 μ m、繊維長 12mm、密度 0.97g/cm³、引張強度 1600N/mm²）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℃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滯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。

表-1 配合表

配合	W/C	水	セメント	石灰石微粉末	珪砂	繊維
PE-0	0.3	378	1260	0	416	12.1
PE-25	0.4	378	945	315	378	12.1

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
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

供試体名の例：PE-0-0.8 逆

PE-0：配合名，0.8：たわみの大きさ（mm），逆：逆方向打設（順方向については記述を省略）

2.2 乾湿繰返し試験

(1) 持続荷重供試体

養生終了後、ボルト挿入のための穴を削孔した。削孔した位置は、ひび割れ導入载荷を実施するときの両支点の位置に一致する。その後、载荷スパン 400mm の一点集中曲げ载荷にてひび割れ導入を行った。表-2 に示した所定のたわみに達した時点で载荷を終了し、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

*1 岐阜大学 自然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（正会員）

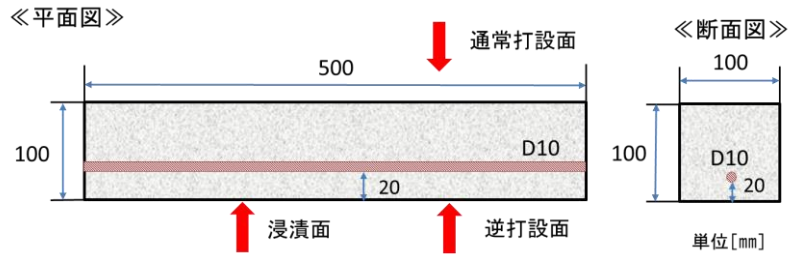


図-1 供試体形状、寸法（単位：mm）

表-3 供試体に導入されたひび割れ（3体の供試体の平均）

ひび割れの種類	配合	たわみ (mm)	平均ひび割れ幅の平均 (mm)	ひび割れ本数の平均	最大ひび割れ幅の平均 (mm)	合計ひび割れ幅の平均 (mm)
持続	PE-0	0.8 逆	0.019	7	0.031	0.12
		0.8	0.019	15	0.036	0.29
		1.2	0.017	13	0.029	0.21
	PE-25	0.8 逆	0.017	7	0.037	0.12
		0.8	0.017	15	0.029	0.20
		1.2	0.021	8	0.056	0.16
残留	PE-0	0.8	0.017	11	0.043	0.19
		1.2	0.029	18	0.056	0.54
	PE-25	0.8	0.016	8	0.045	0.13
		1.2	0.026	14	0.132	0.35



図-2 持続荷重供試体



図-3 残留ひび割れ供試体

び開口させた（図-2）。その状態の供試体上部に口の字型（250×90mm）に組み立てた塩ビ板をシリコンシーラで接着することで貯水槽とした。20℃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。なお、供試体側面のひび割れはエポ

キシ樹脂で被覆し、ここから NaCl 水溶液が漏出するのを防止した。

(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（250×90mm）に組み立てた塩ビ板をシリコンシーラで接着することで貯水槽とした（図-3）。乾湿繰返し試験の条件は持続荷重供試体と同様である。

以上の供試体に発生したひび割れの物性を表-3 に示す。なお、ひび割れ幅の測定は倍率 50 倍のマイクロスコープで行い、ここでは各供試体に発生した全てのひび割れの幅を測定し、その本数、幅の平均値、最大値を求めた上で、同一条件の 3 体の供試体の平均値（本数の平均、平均ひび割れ幅の平均、最大ひび割れ幅の平均）を示している。また、合計ひび割れ幅とは、各供試体内に存在する全てのひび割れの幅を積算した値であり、その 3 体の平均値も示した。また、曲げ載荷を行なったときの荷重-たわみ関係を図-4 に示す。

2.3 測定項目

所定の乾湿繰返し期間が終了した後、コンクリートカッターを用い、500mm の供試体を 150mm+200mm+

150mm の 3 つに切断した。このうち、供試体中央の長さ 200mm の部分を圧縮試験機によって鉄筋に平行に半分に割裂した。割裂後、供試体の割裂面に対して霧吹きで硝酸銀水溶液を噴霧し、変色した部分をスケールで測定して、塩分浸透深さを測定した。さらにその後、 $\phi 10$ のドリルで削孔粉を採取して蛍光 X 線分析（最大出力 40kV-1.75mA）にて塩化物イオン量（全塩分量）を測定した。削孔位置は、図-5 のように塩分浸透深さが最大の位置で、供試体の塩分浸透側表面から 0～10mm, 10～20mm, 20～30mm, 30～40mm の深さから削孔粉を採取した。

続いて供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積を測定した。さらに、60℃の 10%くえん酸水素二アンモニウム水溶液に鉄筋を 24 時間浸漬して除錆することで質量減少量を測定した。なお、腐食していない鉄筋も同様にくえん酸水溶液に浸漬し、その質量減少量を用いて、腐食した鉄筋の質量減少量の補正を行った。

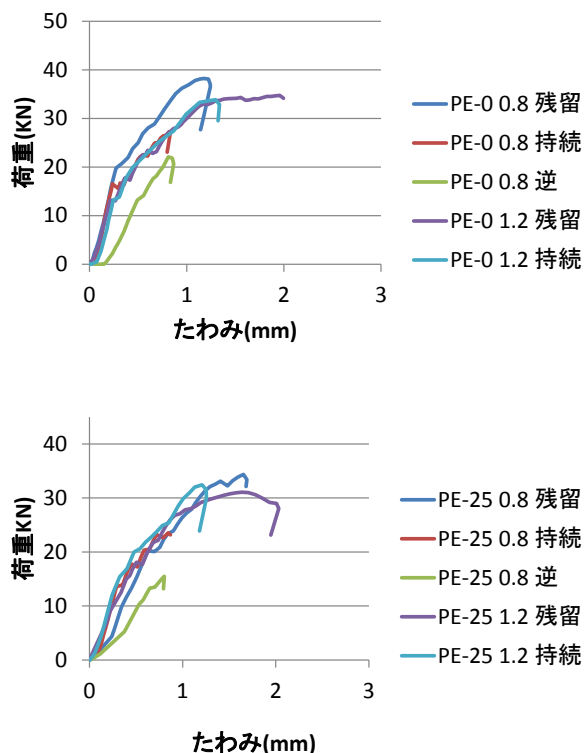


図-4 ひび割れ導入時の荷重－たわみ関係(上/PE-0, 下/PE-25)

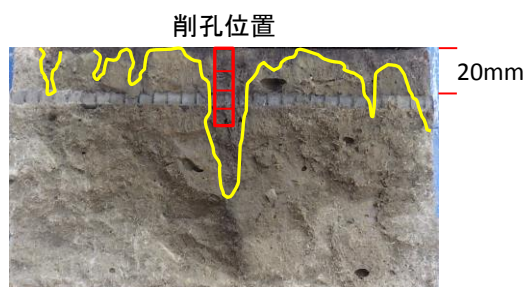


図-5 削孔位置

3. 実験結果

3.1 塩分浸透状況

最大塩分浸透深さをたわみ別に図-6 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が、持続荷重供試体では試験開始直後から浸透深さが大きく、ひび割れ導入方法の影響が認められる。また、ひび割れが存在することにより塩分浸透が助長されることは明瞭に認められ、ひび割れが微細であっても塩分の浸透に影響がある。さらに残留ひび割れ供試体では、劣化促進期間が長くなるにつれて、たわみの違いによる塩分浸透深さの差が小さくなっていった。

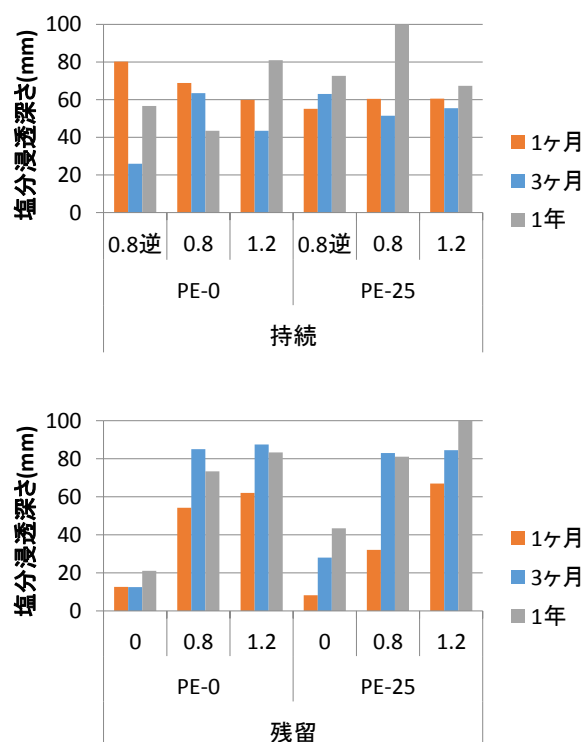


図-6 最大塩分浸透深さ(mm)

(上/持続荷重供試体, 下/残留ひび割れ供試体)

塩分浸透深さが最大となった位置での塩分量を図-7～図-9 に示す。塩分浸透深さの場合と異なり、持続荷重供試体、残留ひび割れ供試体共に、ほとんどの供試体で、劣化促進期間の延長に伴って塩分量も増加していた。

持続荷重供試体については、図-7～図-9 のいずれの劣化促進期間の結果を見ても分かるように、おおむね逆方向打設供試体の塩分量が大きかった。SHCC は極めて単位粉体量が多いためにブリーディング量は非常に小さいのだが、水分移動により水セメント比が鉄筋近

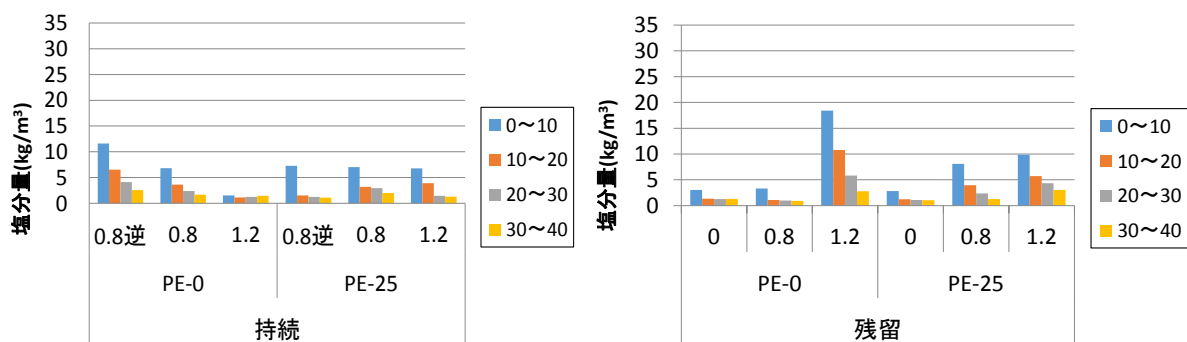


図-7 塩分量-1 ヶ月（左/持続荷重供試体，右/残留ひび割れ供試体。凡例の数字は深さ（mm））

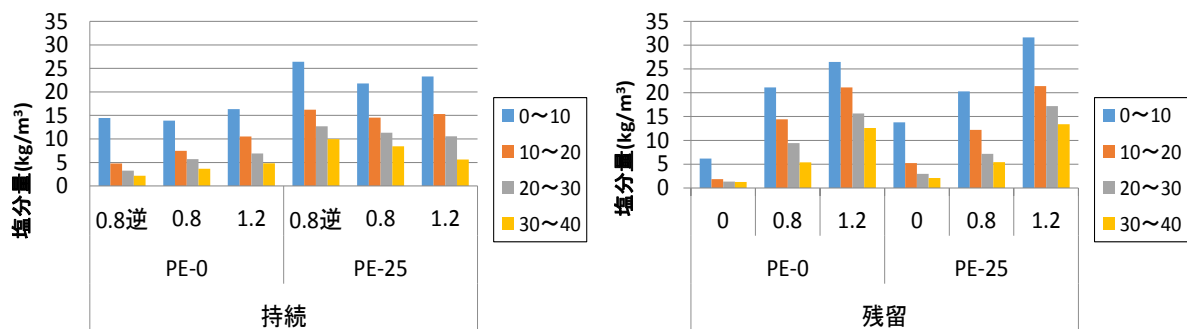


図-8 塩分量-3 ヶ月（左/持続荷重供試体，右/残留ひび割れ供試体。凡例の数字は深さ（mm））

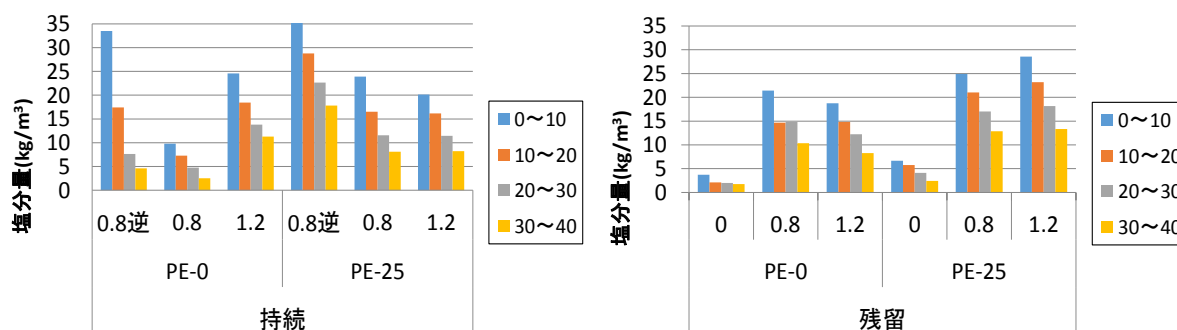


図-9 塩分量-1 年（左/持続荷重供試体，右/残留ひび割れ供試体。凡例の数字は深さ（mm））

傍で大きくなったことが原因として考えられる。また、塩分浸透量に対しては、たわみの違いよりも W/C の影響の方が大きい。これは、ひび割れを通じて供試体内部に浸透した塩分は、その後、マトリックス中を拡散により移動するためであり²⁾、マトリックスの硬化体組織の緻密さが影響したものと考えられる。また、図-7～図-9 のいずれの劣化促進期間でも、同じたわみ量の残留ひび割れ供試体と持続荷重供試体を比較すると、おおむね前者の方が塩分量が多い傾向にあった。既報²⁾にて SHCC のひび割れ破面では、繊維の拔出しにより発生する付着破壊部分に塩分が集積されることが示唆されている。本研究でも残留ひび割れ供試体には一旦大きなたわみを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、そこに塩分が集積されたものと考えられる。

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-10 に示す。なお、写真の「上側」が浸漬面に近い側（かぶり面側）の鉄筋表面、写真の「下側」が供試体内部側の鉄筋表面の様子であり、曲げひび割れの位置を赤線で示す。また、この赤線で示したひび割れ位置は、マイクロスコプを用いて測定しており、その際に同じ位置に複数のひび割れを確認できるものもあったが、それらもまとめて一本の線であらわしている。

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-10 の上の 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-10 の下の 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、前節で述べたように塩分の浸透量が多いうえに、鉄筋との付着破壊が生じた

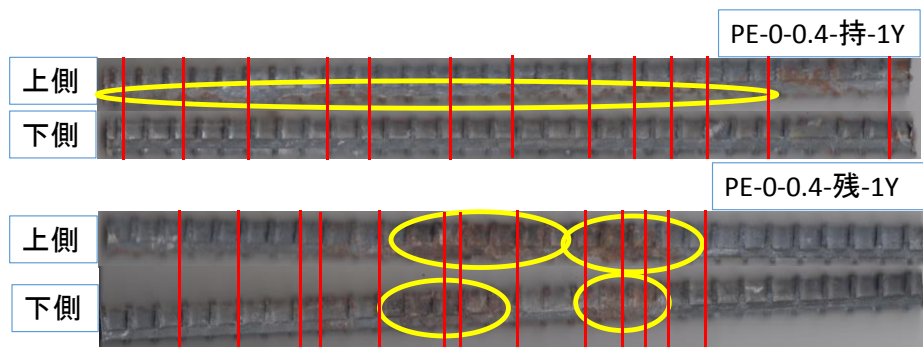


図-10 鉄筋の腐食状況とひび割れ位置の例（—：ひび割れ位置，○：腐食の範囲）
（上/持続荷重供試体－試験期間 1 年，下/残留ひび割れ供試体－試験期間 1 年）

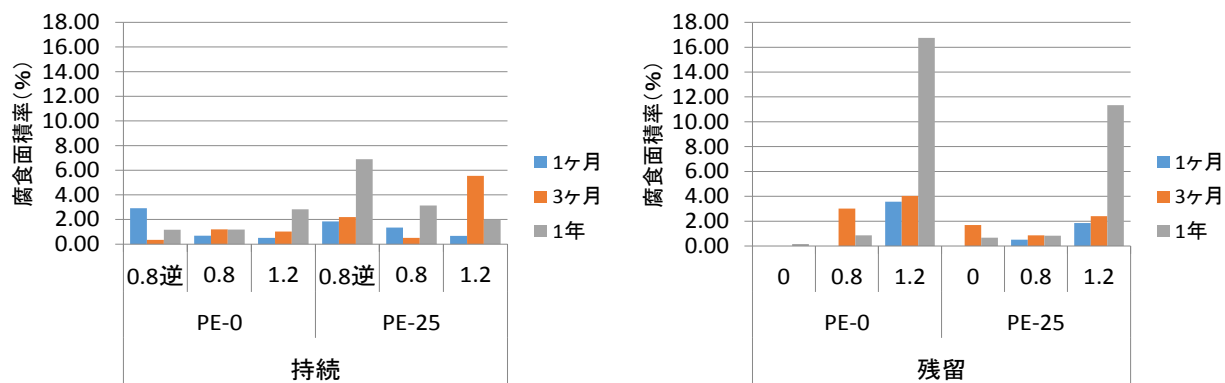


図-11 腐食面積率（左/持続荷重供試体，右/残留ひび割れ供試体）

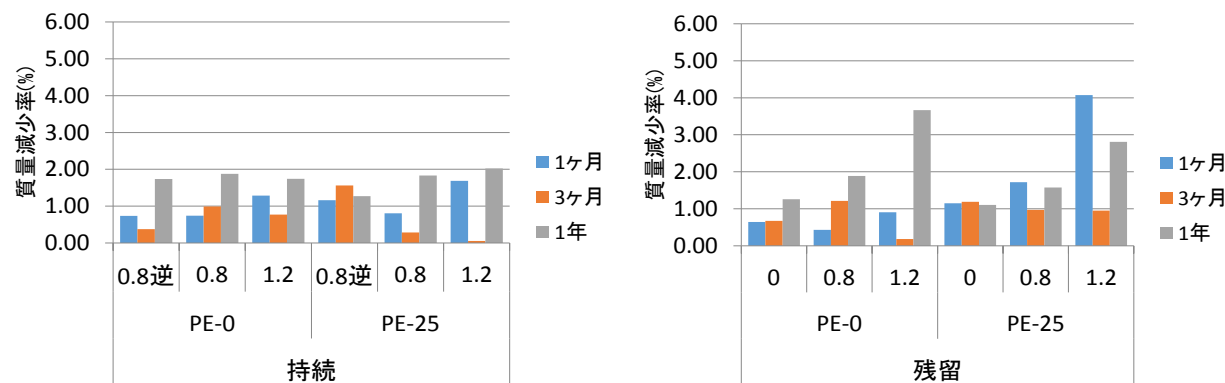


図-12 腐食減量（左/持続荷重供試体，右/残留ひび割れ供試体）

領域も広い可能性がある。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。

(2) 鉄筋の腐食面積

鉄筋の腐食面積率を図-11に示す。ほとんどの供試体で、劣化促進期間が長くなるのに伴って腐食面積も増加傾向にあることが分かる。右側の図に示すように、残留ひび割れ供試体においては、たわみが大きくなると腐食面積も増加したが、左側の図に示すように、持続荷重供試体においては、たわみの影響はそれほど大きくなかった。SHCCの場合には、引張ひずみの発生によって物質透過抵抗性が低下し、鉄筋防食性能が著しく損なわれることはないようである。

また、水セメント比 40%の PE-25 の供試体では、試

験期間 3 か月を除いて逆方向打設供試体が持続荷重供試体の中では最も大きな値を示しており、単位セメント量の少なさに加え、ブリーディングの影響があったものと考えられる。

(3) 鉄筋の腐食減少

鉄筋の腐食減量を図-12に示す。左右の図を比較すると、腐食面積と同様に、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。

(4) 塩分量と鉄筋腐食の関係

図-7～図-9 と図-11, 12 を比較すると、塩分量が大きい供試体では腐食面積率、質量減少率とも大きい傾向にあるという、ある程度の相関がみられた。ただし、塩分量が比較的大きかった逆打設供試体の腐食面積、腐食減量は、他の供試体と比較して特段に大きいわけではなかった。ブリーディングにより鉄筋界面に欠陥が形成されるのはかぶり面と反対側で、塩分や酸素、水が供給されるのはかぶり面側からであり、この違いが腐食の進展に影響した可能性もあるが、詳細については今後の検討課題としたい。

(5) 腐食面積率と質量減少率の関係

試験期間 1 ヶ月と 3 ヶ月の供試体では全ての供試体が表面錆のみとなっており、図-11 に示す腐食面積率と図-12 に示す質量減少率との間に相関は見られなかったが、試験期間 1 年の残留ひび割れ供試体のたわみ 1.2mm では、PE-0, PE-25 とともに他の供試体と比べ鉄筋に欠損の見られる著しい腐食とそれに伴った質量の減少が見られた。これは、前述したように残留ひび割れ供試体では曲げモーメントの大きい中央付近の比較的大きなひび割れに集中して劣化因子が浸透し、試験期間の延長によって鉄筋の一部に集中的に腐食が進んだためであると考えられる。

4. 結論

持続荷重下でのひび割れと、除荷後の残留ひび割れの 2 種類のひび割れが鉄筋腐食に与える影響について検討を行うため、W/C の異なる 2 種類の配合の SHCC ではり部材を作製し、2 種類のたわみを与え、NaCl 水溶液を用いた乾湿繰返し試験を行い、塩分浸透状況と鉄筋腐食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) 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) 試験期間 1 ヶ月と 3 ヶ月の供試体では全ての供試体が表面錆びのみとなっており、腐食面積率と質量減少率に相関は見られなかったが、試験期間 1 年の残留ひび割れ供試体のたわみ 1.2mm では、PE-0, PE-25 とともに他の供試体と比べ鉄筋に欠損の見られる著しい腐食とそれに伴った質量の減少が見られた。

参考文献

- 1) C. Wagner, V. Slowik, GPAG van Zijl, W. Boshoff, SC Paul, V. Mechtcherine, K. Kobayashi: “Transfer of Fluids, Gases and Ions in and Through Cracked and Uncracked Composites,” A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) – State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 240-FDS, GPAG van Zijl and V. Slowik Eds., Springer, pp.27-58, 2017.
- 2) K. Kobayashi, Y. Kojima: Effect of fine crack width and water cement ratio of SHCC on chloride ingress and rebar corrosion, Cement and Concrete Composites, Vol. 80, pp. 235-244, 2017.
- 3) K. Kobayashi, M. Suzuki, LA Dung, HD Yun, K. Rokugo: The effects of PE and PVA fiber and water cement ratio on chloride penetration and rebar corrosion protection performance of cracked SHCC, Construction and Building Materials, Vol. 178, pp. 372-383, 2018.
- 4) 服部祐介, 鈴木雅人, 小林孝一: 吹付け施工した SHCC の曲げひび割れ発生時の鉄筋防食性能, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 16 巻, pp. 263-268, 2016 年 10 月