

論文 表面被覆箇所が生じたひび割れに対する水分作用が鉄筋腐食に与える影響

鈴木 浩明*1・水田 真紀*2・上原 元樹*3・大竹 淑恵*4

要旨: ひび割れ部における水分作用が鉄筋腐食に与える影響を明らかにするために、ひび割れを模擬した種々の試験体を作製し、各方向から水分を塗布したときの質量変化や鉄筋の自然電位について検討した。その結果、水分浸透方向により、必ずしもひび割れ幅と水分浸透量に相関が認められない場合があり、下面からの水分作用では、ひび割れ幅が大きいとき、むしろ水分浸透量が少なくなること、1.0mm 幅の大きなひび割れでも鉄筋腐食が進行しない場合があることなどがわかった。また、中性子イメージングによりひび割れから侵入する水の広がりを捉えた。

キーワード: コンクリート, 表面保護工, 表面被覆材, ひび割れ, 水分浸透深さ, 鉄筋腐食, 中性子線

1. はじめに

表面保護工は、新設・既設のコンクリート構造物を対象とし、構造物の耐久性の回復や向上などを目的としてコンクリート表面へ施工を行うものである。表面保護工のうち、表面被覆工は外部からの劣化因子の侵入防止やコンクリートの剥落防止を目的として施工されることがあるが¹⁾、被覆材の割れや躯体と被覆材のひび割れがしばしば生じている²⁾。また近年、コンクリート構造物に対する水分浸透についての検討例は多いが³⁾、表面被覆箇所に着目した例は少ない。筆者らは、これまでに外部から水などの劣化因子が作用した場合、被覆材の割れのみでは鉄筋腐食への影響は少ないが、被覆材と躯体にひび割れが生じた場合は、ひび割れ周辺に被覆材がある場合においても、内部の鉄筋腐食が助長されることを明らかにしている⁴⁾。しかし、ひび割れ幅の違いや水分作用方向の違いが鉄筋腐食に与える影響は必ずしも明確でない。そこで、種々のひび割れ幅をもつ鉄筋入りのモルタル試験体を作製し、ひび割れに対して水を作用させた場合の質量変化および鉄筋の自然電位を測定し、ひび割れ幅と水分浸透方向が鉄筋腐食に与える影響を検討した。

また、水は鉄筋腐食を助長し、塩化物イオンなどの有害な物質を運ぶキャリアーとして働くほか、凍害などのように水そのものが劣化因子となることもあるため、その挙動を知ることが重要である。筆者らはこれまでにコンクリート内部への水分浸透深さを、試験体を随時破壊し薬剤を噴霧することで検出していたが³⁾、今回、ひび割れ近傍における水分挙動を、同一試験体にて非破壊で可視化できる中性子イメージング⁵⁾にて検討した。

2. 実験概要

表面被覆箇所が生じたひび割れの幅や、水分作用方向の違いが鉄筋腐食に与える影響を検討するために、ひび割れを模擬し鉄筋を埋設した試験体（以後試験体 A とする）、および中性子線によるひび割れ近傍の水分挙動観察を目的とした試験体（以後試験体 B とする）を作製した。

2.1 鉄筋を埋設した試験体 A の実験概要

(1) 試験体作製

作製した試験体 A の概念図を図-1、使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2、表面被覆材の使用材料を表-3 に示す。試験体の寸法は 10cm 角とし、模擬ひび割れおよび塗膜割れは、鉄筋と直交する方向に金属スリットをモルタルや被覆材中に介在させ、一定時間後に除去することにより導入した。ひび割れ幅は 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm の 7 種類とした。また、鉄筋のかぶり高が 25mm である一方、ひび割れの深さは 30mm であり、模擬ひび割れの先端は鉄筋の中心付近まで到達している。

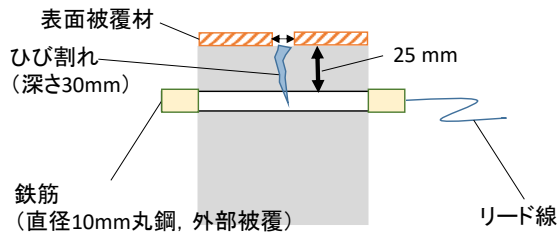
図-1 に示すとおり模擬ひび割れ部が打込み面である。また母材モルタルは打込み後 1 週で脱型し、材齢 3 か月まで 20°C, 60% R.H. 環境下で静置した。その後、図-2 に示すように、ひび割れ面に表面被覆材、側面にはひび割れからの漏水を防ぐ目的でシーリング材を施工した。また、鉄筋にはリード線を取り付け、露出した鉄筋は腐食を防ぐため鉄筋やリード線取付け部の露出箇所を被覆材で被覆し、材齢 5 か月まで 20°C, 60% R.H. 環境下で静置した。なお、水分作用方向の違いに関しては、ひび割れの補修工法が変化する目安となる、ひび割れ幅 0.2mm および 1.0mm の試験体で検討している。

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 修士 (工学) (正会員)

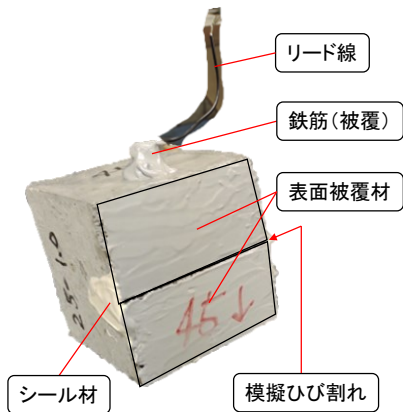
*2 (国研) 理化学研究所 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 博士 (工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士 (工学) (正会員)

*4 (国研) 理化学研究所 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 博士 (理学) (正会員)



図－1 試験体 A の概念図



図－2 試験体の作製状況

表－1 試験体 A および試験体 B のモルタルの使用材料

材料(記号)	種類(名称, 品質)
セメント(C)	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材(S)	標準砂
練混ぜ水(W)	上水道水

表－2 試験体 A および試験体 B のモルタルの配合

W/C (%)	W(kg)	C(kg)	S(kg)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
50	225	450	1350	47.5

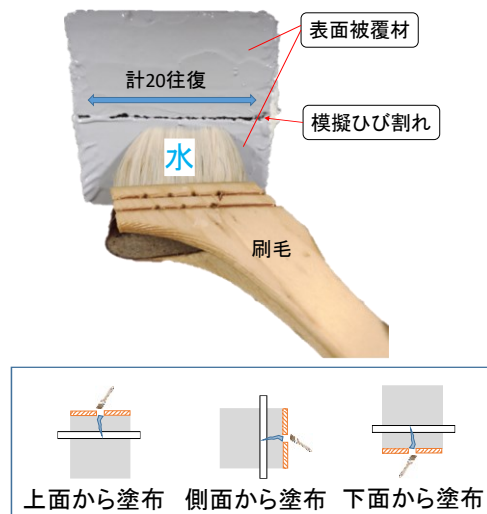
表－3 試験体 A および試験体 B に用いた表面被覆材の使用材料

試験体	種類(略称)	材料種類	配合比(重量比)	塗布量 g/m ²
(A)	有機系 (TG)	プライマー	塗料液 : 硬化剤 = 85 : 15	100
		パテ	塗料液 : 硬化剤 = 2 : 1	500
		中塗	塗料液 : 硬化剤 = 5 : 1	670
		上塗	塗料液 : 硬化剤 = 7 : 1	120
	無機系 (SM)	プライマー	一液型	150
		主材	主剤: 混和材: 水 = 0.6:1.1:0.2	1000
		主材	主剤: 混和材: 水 = 0.6:1.1:0.2	500
		表面保護材	一液型	150
(B)	有機系 (TG)	表面保護材	一液型	150
		プライマー	塗料液 : 硬化剤 = 85 : 15	100
		パテ	塗料液 : 硬化剤 = 2 : 1	500
		中塗	塗料液 : 硬化剤 = 5 : 1	670
		上塗	塗料液 : 硬化剤 = 7 : 1	120

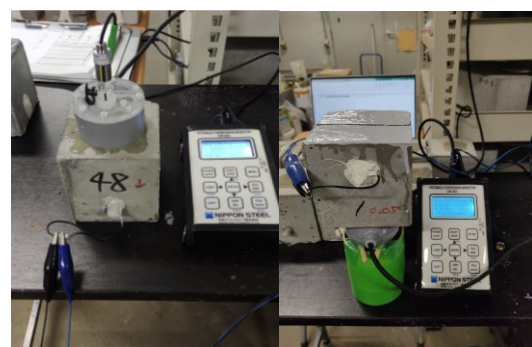
(2) 水塗布試験

上記で作製した鉄筋埋設試験体のひび割れに対して水塗布を行い、質量および鉄筋の自然電位を測定した。水塗布の概念図を図－3に示す。刷毛 25 号の穂に約 10g の水を含んだ状態でひび割れ近傍に対して 5 往復させる工程を 1 工程とし、その工程を 1 日の短時間に 4 回繰り返すことで水塗布試験とした。その後、20℃、60%R.H. の環境中で 6 日間静置した。この計 7 日間を 1 サイクルとし、10 サイクルの試験を実施した。水塗布の方向は、ひび割れを鉛直上向きとし上面から水分を塗布するもの、ひび割れを側面に向け側面から塗布するもの、ひび割れを鉛直下向きとし下面から水分を塗布するものの計 3 種類とした。試験体の質量および鉄筋の自然電位の測定時期は、水塗布前後とした。鉄筋の自然電位の測定は図－4に示すとおり、被覆材を施工しておらず、水塗布面の反対側、すなわち、かぶりが 60mm となる面に照合電極を押し当て、鉄筋との腐食回路を形成し測定した。

さらに、材齢 8 か月まで 20℃、60%R.H.環境下で試験体を静置し、試験開始時の質量と同等とした後に滞水による影響を調べるため同一試験体にて追試を行った。



図－3 水塗布の概念図



(a)ひび割れ下向き方向 (b)ひび割れ上向き方向

図－4 鉄筋の自然電位測定概念図

2.2 試験体 B の実験概要

(1) 試験体作製

モルタル試験体の使用材料を表-1、配合を表-2、表面被覆材の使用材料を表-3 に示す。試験体の打ち込み後の寸法は 100×100×100mm であるが材齢 9 か月以降に立方体試験体の 6 面を切断して、中性子イメージング試験のために 70×70×30mm に寸法を調整した。その後、材齢 9.5 か月まで 20℃相対湿度 60%の恒温恒湿内で静置した後、14 日間 40℃環境下で乾燥を行い、再度 1 日間 20℃、60%R.H.の恒温恒湿内で静置した後、表面被覆材をひび割れを除く水分が作用する箇所に施工し、材齢約 10 か月で試験に供した。

(2) 中性子線による試験

ひび割れ近傍における水分挙動を明らかにするため、図-5 に示すように試験体のひび割れ部を含む面を水に 5mm 浸漬させる一面浸漬試験の後、中性子イメージングにより水の浸透状況を観察した。ここで、中性子イメージング試験を概説する。中性子は骨材に多く含まれるカルシウムやケイ素に対して優れた透過力を示す一方、水素に強く散乱される性質を持つため、試験体内部に元々含まれる水分や浸透水分が存在する箇所に陰影がついた透過像が得られる。中性子線透過方向の積算値として透過度が出力されるため、透過方向に分布する水素の多少に対応して影の濃さが変化する。この原理から、透過度の分布が吸水量分布に相当するものとなる。

一面浸漬試験開始から 4, 24, 48 時間後に、試験体を水から取り出し、試験体表面の水分をウェス等で拭き取り質量を測定した後、試験体を測定用ステージにセットして中性子イメージングを実施した。中性子源から出力される中性子線を 3 分間照射し、中性子コンバータと CCD カメラから成る検出器（本評価では中性子イメージング用テンシファイアを使用）によって中性子透過像（中性子線によるレントゲン写真に相当する）を出力した。なお、画像解析は文献⁵⁾に示す方法で行った。ここで、浸漬面は、模擬ひび割れ導入の都合上、試験体作製時の打込み面である。



図-5 一面浸漬試験の概念図

3. 実験結果および考察

3.1 試験体 A の質量変化

水塗布前後の質量を測定し、その差を水分浸透量として整理した結果を図-6~11 に示す。ここで、1 サイクル、5 サイクル、10 サイクルの結果を代表として示す。上面から水分を塗布した場合、いずれの測定時期においても、ひび割れ幅と水分浸透量に相関が認められ、その近似直線の傾きは試験サイクルの経過に伴い減少した。これは、ひび割れ幅が大きいほどひび割れに作用する水が多く、水塗布の繰り返しによって、ひび割れ近傍におけるモルタルの含水率が高くなり、水分の浸透が抑制されたことによると考えられる。また、水分作用方向を下面から塗布とした場合、ひび割れ幅 0.2mm では、上面から塗布と同程度かやや少ない水分浸透が認められた一方、ひび割れ幅が 1.0mm では水分浸透はほとんど認められなかった。さらに、側面から塗布した場合、水分浸透量は上面から塗布と下面から塗布の中間程度となった。これは、毛管浸透の駆動力がひび割れ幅や重力の作用方向により異なる一方で、ひび割れ幅が 1.0mm では、繰り返しの水塗布により、水分の作用方向によってはひび割れ部に水分が滞留するなど、その作用機構が異なるためと考えられる。なお、表面被覆材の種類による明確な違いは認められなかった。

以上の結果より、ひび割れ幅と水分浸透量には相関が認められるが、水塗布を繰り返すと水分が浸透しづらくなることや、水分作用方向によってはひび割れ幅と水分浸透量に相関が認められない場合があることがわかった。

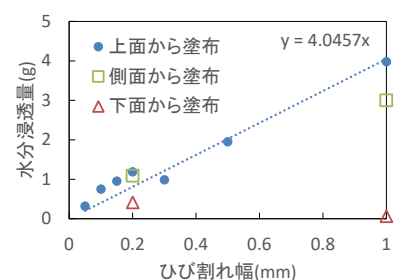


図-6 質量変化（有機系-1 サイクル）

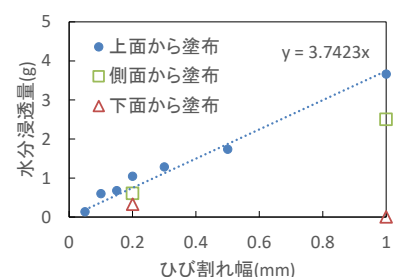


図-7 質量変化（有機系-5 サイクル）

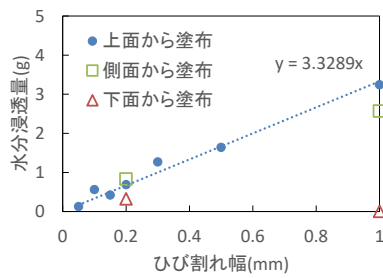


図-8 質量変化（有機系-10 サイクル）

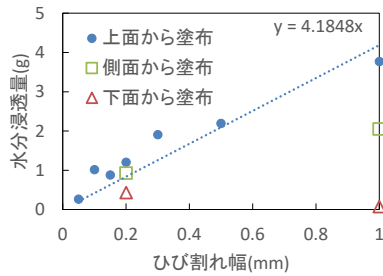


図-9 質量変化（無機系-1 サイクル）

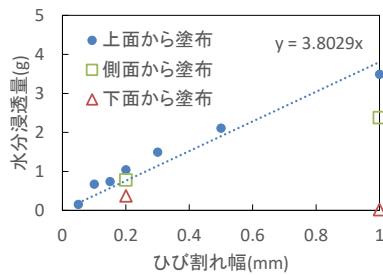


図-10 質量変化（無機系-5 サイクル）

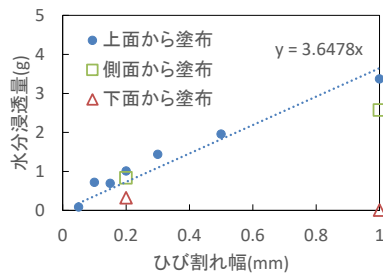


図-11 質量変化（無機系-10 サイクル）

3.2 試験体 A における鉄筋の自然電位

水塗布前後の自然電位を測定した結果を図-12～17に示す。ここで鉄筋の自然電位の評価については、土木学会規準⁶⁾および今回は照合電極として銀塩化銀電極(SSE)を使用したことから式1⁷⁾に従って、表-4に示すとおり自然電位が-90mV vs SSEより貴において90%以上の確率で腐食なし、-230mV vs SSEより卑において90%以上の確率で腐食ありに該当するとした。

図-12, 13 はひび割れに対して上面から水を塗布した結果であり、有機系被覆材および無機系被覆材のいずれ

においても、ひび割れ幅によって鉄筋の自然電位は異なる挙動を示すことがわかる。ひび割れ幅が0.05mmから0.3mmではいずれの測定時期においても腐食なし、あるいは不確定と判定される一方、ひび割れ幅が0.5mmもしくは1.0mmでは水塗布後に腐食ありと判定される場合がある。

また、図-14, 15 はひび割れに対して上面、側面、下面から水を塗布した結果であり、有機系被覆材および無機系被覆材のいずれにおいても、ひび割れ幅が0.2mmでは腐食なしもしくは不確定と判定された。一方、ひび割れ幅が1.0mmでは上面あるいは側面からの塗布によって腐食ありと判定されるが、下面からの塗布では腐食なしもしくは不確定と判定された。

ここで、図-12, 13 の測定結果は、ひび割れに水を塗布した後、図-4(a)に示すとおり試験体のひび割れ面を下向き、すなわちひび割れ内に滞水した水分が除去されやすい方法で測定したものである。一方、上面から水分が作用した場合はひび割れ部が滞水すると考えられる。そこで、ひび割れ部の滞水が鉄筋の自然電位に与える影響を調べるため、図-12, 13における水塗布前の自然電位に着目した結果を図-16, 17、また図-4(b)に示すとおり、ひび割れ部が滞水する条件で測定した水塗布前の自然電位の結果を図-18, 19に整理した。有機系被覆材および無機系被覆材のいずれにおいても、滞水条件では試験サイクル数とともに自然電位が卑となり、判定として不確定および腐食ありへの該当が増加した。

以上の結果より、ひび割れ幅が0.5mmもしくは1.0mmで鉄筋が腐食ありと判定される一方、下面からの作用ではひび割れ幅1.0mmにおいても腐食なしと判定されることがわかった。ただし、ひび割れの発生原因や暴露環境により補修の要否は別途検討が必要であると考えられる。また、ひび割れに滞水した場合、ひび割れ幅に応じて自然電位が卑側へ移行したが、滞水の影響が無い場合、むしろ貴となる傾向であることがわかった。なお、鉄筋腐食に影響を与える溶存酸素量および濡れやすさや乾きやすさについては今後検討する。

表-4 自然電位と鉄筋腐食特性の関係

自然電位(E) [mV vs SSE]	鉄筋腐食の可能性
-90<E	90%以上の確率で腐食なし
-230<E≤-90	不確定
E≤-230	90%以上の確率で腐食あり

$$E_{t,CSE}^{Fe} = E_{t,SSE}^{Fe} - 120.1 - 2.00 \cdot (t - 25) \quad (1)$$

ここに $E_{t,CSE}^{Fe}$ (mV) : 温度 t (°C) における飽和硫酸銅電極に対する鉄筋の自然電位測定値

$E_{t,SSE}^{Fe}$ (mV) : 温度 t (°C) における飽和銀・塩化銀電極に対する鉄筋の自然電位測定値

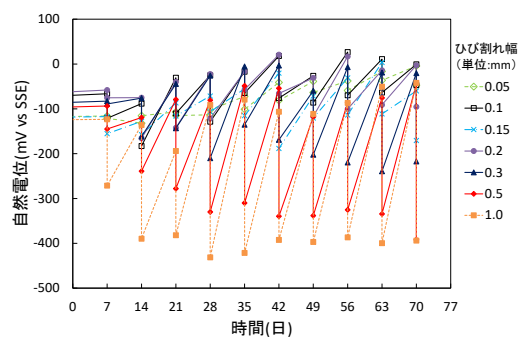


図-12 自然電位（有機系-ひび割れ幅の違い）

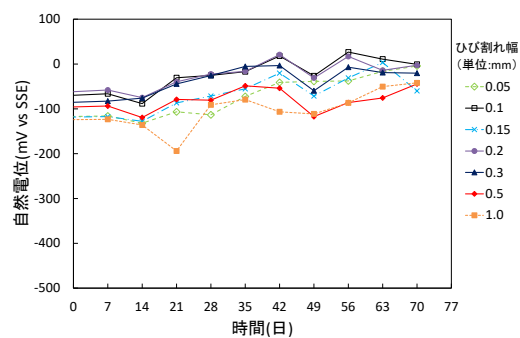


図-16 自然電位（有機系-滞水の影響なし）

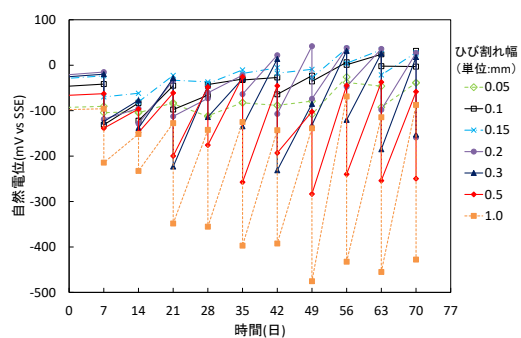


図-13 自然電位（無機系-ひび割れ幅の違い）

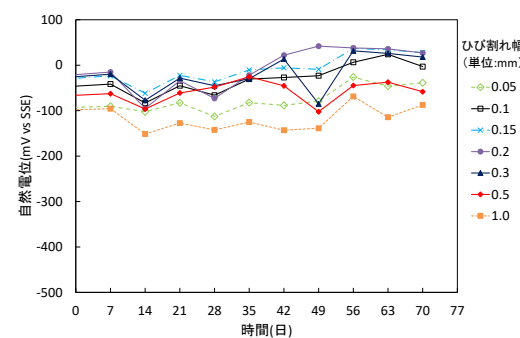


図-17 自然電位（無機系-滞水の影響なし）

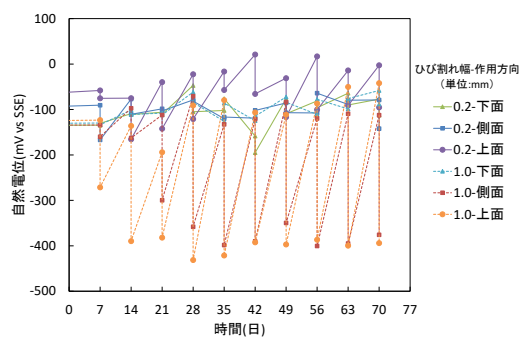


図-14 自然電位（有機系-作用方向の違い）

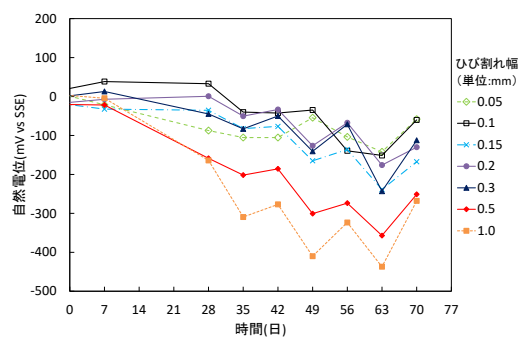


図-18 自然電位（有機系-滞水の影響あり）

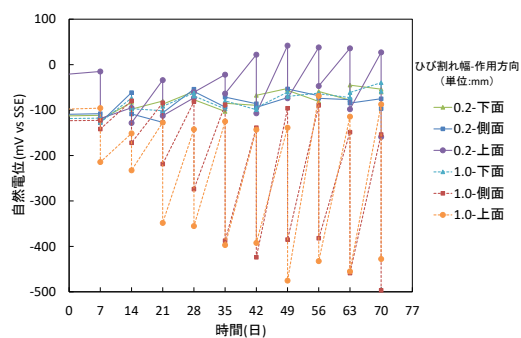


図-15 自然電位（無機系-作用方向の違い）

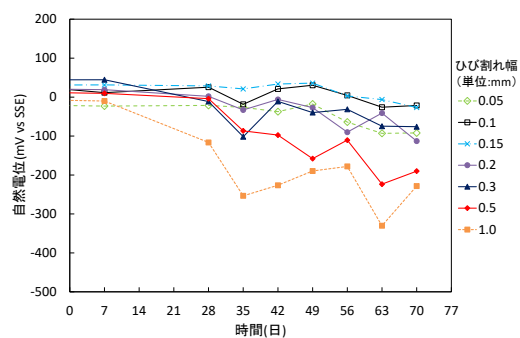


図-19 自然電位（無機系-滞水の影響あり）

3.3 試験体 B の中性子イメージング

試験体 A ではひび割れへの水分浸透量を検討したが、水分浸透範囲は不明なため、試験体 B ではひび割れ近傍における水分浸透範囲を検討した。図-20, 21 は一面浸漬前後の差分画像であり、水分が浸透した箇所が陰影の濃淡で表現される。ここで、表面被覆材として広く使用される材料は、モルタルと比較して被覆材自体が持つ水素量が多い。例えば、本試験ではプライマー、パテ材にエポキシ樹脂、主材にポリブタジエン樹脂、上塗り材にフッ素樹脂が成分として含まれている。そのため、母材モルタルと比較して表面被覆材の持つ水素量が多いことから水分浸透の差を明確に捉えられないことが考えられたが、本試験の質量変化および中性子イメージングの結果より、表面被覆材を用いた試験体においても浸漬前後の差分を取ることで中性子によるイメージングが可能であることがわかった。

被覆材の有無による水分浸透範囲の違いを図-20 に示す。被覆なしではひび割れを中心とした山なり様に水分が浸透しており、一面浸漬面およびひび割れからの吸水の影響が伺える。一方、被覆ありでは吸水量が抑制されるが、ひび割れを中心に水分が浸透することがわかった。また、水分浸透範囲の経時変化を図-21 に示す。経時によって水分浸透範囲が広がるが、4 時間から 24 時間の変化と比べて 24 時間から 48 時間の変化が少なく、モルタルが飽水状態に近づいていると考えられる。

以上、中性子イメージングによりひび割れ近傍における水分挙動の可視化を試みた結果、本試験条件においては、表面被覆材施工箇所における測定が可能であること、被覆材の有無により水分浸透範囲と吸水量が異なること、経時によって水分浸透範囲が広がることがわかった。

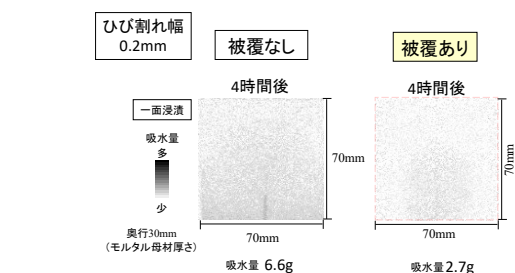


図-20 中性子イメージングの結果（被覆材の有無）

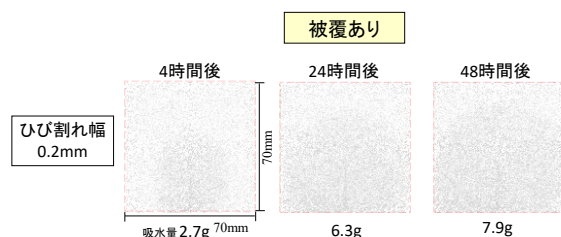


図-21 中性子イメージングの結果（経時変化）

4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ幅と水分浸透量には相関が認められるが、水塗布を繰り返すと水分が浸透しづらくなることや、下面からの水分作用ではひび割れ幅と水分浸透量に相関が認められない場合があることがわかった。
- (2) ひび割れ幅が 0.5mm もしくは 1.0mm で上面から水が作用した場合、鉄筋が腐食ありと判定される一方、下面からの作用ではひび割れ幅 1.0mm においても腐食なしと判定された。ただし、ひび割れの発生原因や暴露環境により補修の要否は検討が必要と考える。
- (3) ひび割れに滞水した場合、ひび割れ幅に応じて自然電位が卑側へ移行したが、滞水の影響が無い場合、むしろ貴となる傾向であった。
- (4) 中性子イメージングによりひび割れ近傍における水分挙動の可視化を試みた結果、本試験条件においては、表面被覆材施工箇所における測定が可能であること、被覆材の有無により水分浸透範囲と吸水量が異なること、経時によって水分浸透範囲が広がることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針（案）[工種別マニュアル編]，丸善，pp.9, pp.108, pp.109, 2005
- 2) 宮本祐輔，吉田幸司ほか：報告 既設表面保護工の健全性と水の影響に関する実橋調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.2, pp.1321-1326, 2018
- 3) 鈴木浩明，上田洋：コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.676-681, 2014
- 4) 鈴木浩明，鶴田考司ほか：ひび割れに伴う塗膜割れがコンクリート試験体への水分浸透と鉄筋腐食に与える影響，土木学会第 74 回年次学術講演会，V-476, 2019
- 5) 吉村雄一，水田真紀，大竹淑恵，林崎規託：中性子イメージングによる厚さ 5cm のコンクリート供試体に浸透する水の非破壊定量手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1683-1688, 2018
- 6) 土木学会：コンクリート構造物における自然電位測定方法（JSCE-E601-2000）・同解説，鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向その 2 コンクリート委員会腐食防食小委員会 2 期目報告，コンクリート技術シリーズ 30, pp.248-256, 2000
- 7) 篠田吉央，望月紀保：鉄筋自然電位の測定温度に伴う照合電極間の電位換算について，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-224, pp.447-448, 2011