

コンクリート断面修復部の中性子線による水分挙動の観察

鈴木 浩明* 上原 元樹* 水田 真紀** 大竹 淑恵**

Moisture Behavior in Concrete Repaired by Patching Observed with Neutron Imaging

Hiroaki SUZUKI Motoki UEHARA Maki MIZUTA Yoshie OTAKE

The cross sectional repair of concrete structures is carried out for the purpose of restoring or improving durability. However, some re-deterioration such as corrosion of reinforcing bar, floating of repair materials, peeling is observed. Such re-deterioration is considered to be due to deterioration factors such as water that has permeated the repair area. In this paper, we report the result of non-destructive visualization of the moisture behavior of the repair area using a neutron beam tester.

キーワード：コンクリート，断面修復，水分浸透，鉄筋腐食，界面

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物の補修方法として、劣化部分をはつりとして補修する断面修復が広く適用されている。断面修復は、耐久性の回復や向上などを目的として行われているが、一部では鋼材腐食、断面修復材の浮き、はく離・はく落などの再劣化がみられる。これらの再劣化は、断面修復部に浸透した水や塩化物イオンなどの劣化因子によると考えられる。特に水は、鉄筋腐食を助長するほか、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き、凍害のように物理的な劣化因子となることもあるため、その挙動を知ることは重要である。

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¹⁾が、これらはコンクリート単体に対しての検討であり、断面修復部の周辺に着目した例は少ない。筆者らはこれまでに、母材コンクリートと断面修復材との界面処理方法が断面修復部における水分挙動に与える影響を明らかにするため、1MPaの水圧を48時間掛ける透水試験により検討し、プライマー処理や水湿し処理により透水係数が小さくなることを示した²⁾。また、コンクリート内部への水分浸透深さを、試験体を破壊し薬剤の噴霧により検出する方法について検討した¹⁾。しかし、水掛かりなどの常圧における水分作用が断面修復部の周辺における水分挙動に与える影響はわかっていない。そこで、断面修復部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線試験装置を用いた可視化技術³⁾にて検討したので報告する。

母材コンクリートの含水状態や、塩化物イオンの含有状態によっては、プライマーの反応不良等が生じ、断面修復部の界面における水分挙動が変化し鉄筋腐食を助長

することが懸念される。そこで、基礎的検討として種々の断面修復材に関してコンクリートと断面修復材との界面における下地処理方法、およびコンクリート母材における塩化物イオンの含有状態の異なる鉄筋埋設型試験体の塩水噴霧試験を実施し、質量変化や鉄筋の自然電位から界面における水分挙動と鉄筋腐食との関係を検討した。

2. 実験概要

界面における水分挙動が鉄筋腐食に与える影響を検討するために、断面修復部を模擬し鉄筋を埋設した試験体（以後試験体A）、および中性子により断面修復部分の界面における水分挙動を可視化するために、断面修復部の一部を切り出した試験体（以後試験体B）を作製した。

2.1 鉄筋を埋設した試験体Aの実験概要

2.1.1 試験体Aの作製

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、断面修復材の使用材料を表3に示す。試験体の寸法は100mm角とし、かぶりを30mmとした。断面修復を模擬するため、図2に示す通り、あらかじめ下層に母材コンクリートを50mm程度打ち込み、その上に断面修復材を施工した。ここで、断面修復材とコンクリートとの界面の状態が鉄筋腐食に与える影響を明らかにするため、図3に示すようにφ100mmの丸鋼を埋設した母材コンクリートに対し、プライマー施工の有無、10000mm²あたり2.0gの水湿し処理、塩化物イオンが10kg/m³となるように塩化ナトリウムを外割で練り混ぜ高塩分状態とする処理を行った。また、比較としてコンクリートのみもしくは断面修復材のみで作製した試験体を準備した。試験体数は塩水噴霧試験に供するものでは1条件につき3体、気中静置では1体とした。

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

** 国立研究開発法人 理化学研究所

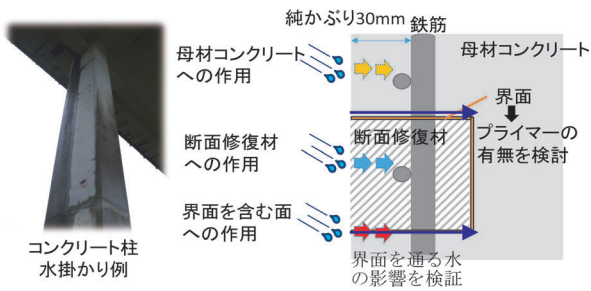


図1 試験体の概念図

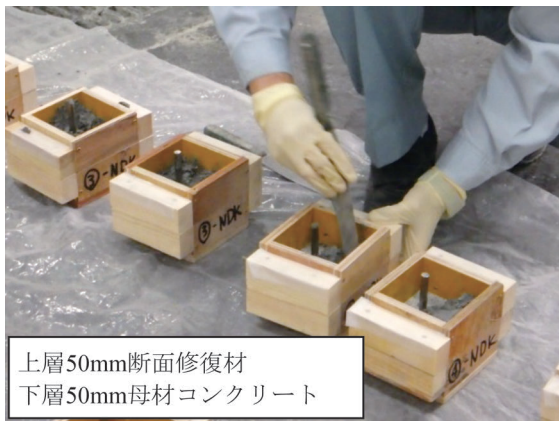


図2 試験体の作製状況

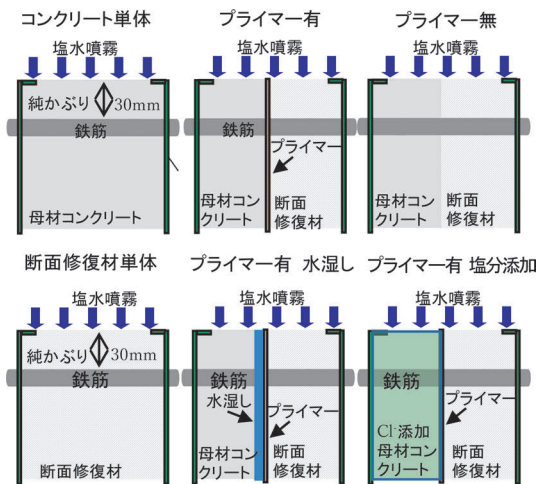


図3 試験体の作製概念図

表1 試験体 A および試験体 B のコンクリートの使用材料

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)	陸砂 (表乾密度2.58g/cm ³)
粗骨材(G)	碎石 (表乾密度2.66g/cm ³)
混和剤(Ad)	AE減水剤
練混ぜ水(W)	上水道水

表2 試験体 A および試験体 B のコンクリートの配合

試験体	W/C	s/a	塩化物イオン量	W	C	S	G	Ad
	%		kg/m ³					
(A)	60	48.0	0	180	300	836	934	0.0045
			10.0					
(B)	60	48.0	0	180	300	841	938	0.0040

表3 試験体 A および試験体 B に用いた断面修復材の使用材料

試験体	略称	材料種類	配合比	塗布量
				g/m ²
(A) および (B)	NDK	プライマー	主剤:硬化剤=1:1	2
		断面修復材	主剤:混和液:水=20:3:1.5	--
(B)	VF	プライマー	主剤:水=3:1	6
		断面修復材	主剤:水=20:3.25	--
(A)	AM	プライマー	主剤:水=1:9	1
		断面修復材	主剤:水=20:3.4	--

2.1.2 断面修復材の施工

試験体は、母材コンクリートの打込み後材齢1日で母材表面の目荒しを行い、清掃後に図3に示す種々の界面処理を行った。その後、断面修復材を施工し、20℃、60%R.H.環境下で14日間静置した。脱型後、試験面とその反対側の面は開放し残り4面を被覆材にて被覆し、材齢28日まで同環境で静置した。なお、試験体作製の都合上、試験方向は打込み方向から90°回転している。

2.1.3 塩水噴霧による試験体 A の鉄筋腐食試験

上記で作製した鉄筋埋設試験体、比較用のコンクリート単体、断面修復材単体に関して塩水噴霧試験に供し、質量および鉄筋の自然電位を測定した。噴霧した塩水濃度は3%とし、およそ0.6g/cm²/hの割合で1日噴霧し、その後、乾燥環境で6日間静置した。この計7日間を1サイクルとし、供試体の質量および鉄筋の自然電位の測定時期は、噴霧開始前および噴霧開始から7、14、28日後とした。鉄筋の自然電位の測定は図4のように、被覆材を施工しておらず、塩水噴霧の反対側となるかぶりが60mmの面に照合電極を押し当て、鉄筋との腐食回路を形成することで測定した。なお、一部試験体は比較として20℃、60%R.H.の環境中に静置した。

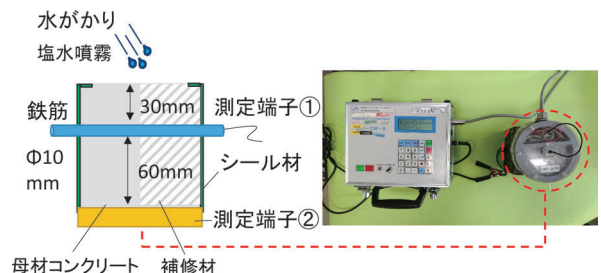


図4 塩水噴霧試験と鉄筋の自然電位測定概念図

2.2 試験体 B の実験概要

2.2.1 試験体 B の作製、養生と強度試験

コンクリートの諸元は2.1節と同じく表1～表3のとおりである。試験体の寸法は100×100×100mmであり、母材コンクリートを5cm打ち込み後、20℃、60％R.H.にて材齢7日まで養生した後に、表3に示す有機系（VF）および無機系（NDK）の断面修復材を5cm施工した。材齢28日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70×70×25mmに寸法を調整した。その後、材齢6週まで20℃相対湿度60％の恒温恒湿内で静置した後、材齢9週まで40℃環境下で乾燥を行い、再度材齢11週まで20℃、60％R.H.の恒温恒湿内で静置した。また、コンクリート単体の強度試験用に円柱試験体φ100×200mmを3体作製し、28日経過時にJIS A 1108に準じて圧縮強度・静弾性試験を行った。

2.2.2 試験体 B の試験

母材コンクリートと断面修復材、およびこれらの界面付近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界面を含む面を水に5mm浸漬させる一面浸漬試験の後、中性子線イメージング試験をした。

ここで、中性子線イメージング試験を概説する。中性子はコンクリートに多く含まれるカルシウムやケイ素に対して高い透過力を示す一方、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増減する。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。



図5 一面浸漬試験の状況

一面浸漬試験開始から24、48、72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線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シールドを使用）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、画像解析はオープンソースソフトであるImageJを用いて行った。ここで、浸漬面は、試験体の打ち込み上面のブリーディングの影響や、下面の圧密による影響を少なくするため、試験体作製時の側面とした。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの基礎特性

表4にコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度および静弾性係数を示す。

表4 鉄筋腐食試験用コンクリート（A）および中性子イメージング試験用コンクリート（B）のフレッシュ性状、圧縮強度と静弾性係数

試験体	NaCl 添加	スランブ	空気量	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
		cm	%		
(A)	無	14.0	4.0	26.5	24.1
	有	18.5	4.2	30.4	24.5
(B)	無	18.5	3.8	32.7	29.0

3.2 試験体 A の質量変化

試験体 A の質量変化について、コンクリートおよび断面修復材単体の結果を図6、断面修復を模擬した試験体の質量の測定結果を図7に示す。いずれの試験体においても1サイクルで質量が増加し、その後の質量変化は小さかった。図6より、コンクリート単体に比べて、塩化ナトリウムを添加したコンクリートや断面修復材単体の質量増加は小さく、特に断面修復材単体ではいずれの種類においても質量変化量がコンクリートの約1/8程度と小さかった。また、図7より、いずれの断面修復材においてもプライマー施工の有無による明確な差はみられなかった。これは、母材コンクリートと断面修復材への水分の作用面と比較して、界面部の面積がごく小さく、質量変化はコンクリート単体もしくは断面修復材単体の表面全体から浸透した水分の影響を大きく受けるためと考えられる。

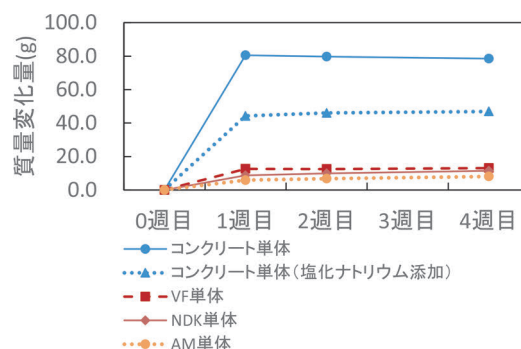


図6 コンクリート単体と断面修復材単体の質量変化

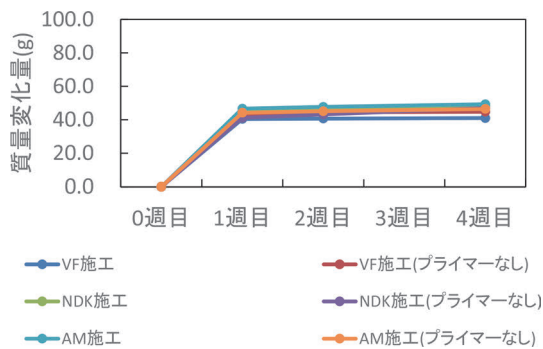


図7 コンクリートに断面修復材を施工した試験体のプライマーの有無による質量変化

3.3 試験体 A における鉄筋の自然電位

表5に土木学会規準⁴⁾による自然電位と鉄筋腐食の可能性を示す。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(1)⁵⁾に従って表5における銅硫酸銅電極(CSE)の値を補正し、自然電位が-310mV vs SSEより貴において90%以上の確率で腐食なし、-460mV 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。

表5 自然電位と鉄筋腐食特性の関係

自然電位(E) [mV vs CSE]	鉄筋腐食の可能性
-200<E	90%以上の確率で腐食なし
-350<E≤-200	不確定
E≤-350	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

鉄筋の自然電位の測定結果を図8～図12に示す。図8より、塩水噴霧試験に供さず、20°C 60%R.H.の環境中に静置した試験体では、塩化ナトリウム添加の有無や断面修復材の種類に関わらず自然電位の変化は小さく一定の値を示した。図9より、コンクリート単体では1サイクルの試験において自然電位が卑となり、その後、自然電位の変化は小さかった。一方、塩化ナトリウムを添加したコンクリートでは、塩水噴霧試験に供する前から卑の値を示し、試験開始後もその値に大きな変化はなく、塩水噴霧の影響は小さかった。また、断面修復材単体においても塩水噴霧により自然電位が14日でコンクリート単体と同程度まで自然電位の値が卑となった。

図10～図12より、断面修復を模擬した試験体における鉄筋の自然電位について、母材コンクリートにプライ

マーを施工した後に断面修復材を施工した試験体(通常施工)ではコンクリート単体と同程度の自然電位を示した。一方、プライマーを施工せず、断面修復材を施工した場合、値のばらつきが大きいのが、通常施工と比較してより卑となり、90%以上の確率で腐食ありと判定される領域の値を示した。また、母材コンクリート界面を水湿し処理した上で通常施工した試験体では、プライマーを施工する通常施工と同様にプライマー未施工と比較して貴側となる傾向を示した。さらに、塩化ナトリウムを含むコンクリート母材に断面修復を行ったものでは、塩化ナトリウムを含むコンクリート単体における自然電位の結果と同様に塩水噴霧前から卑の値を示し、界面における塩化物イオン量の相違が鉄筋腐食に与える影響は明確でなかった。

以上より、母材コンクリートと断面修復材との界面をプライマーやプライマーおよび水湿し処理することで、界面における水分移動が抑制され、断面修復部における鉄筋腐食の進行を抑制できることが示唆された。

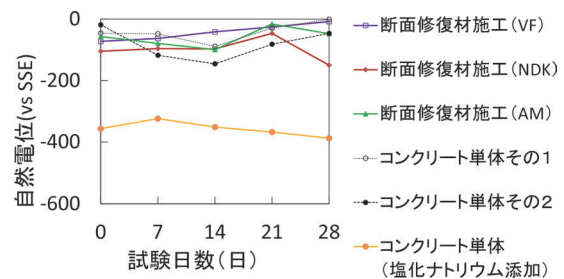


図8 気中に静置した試験体の自然電位

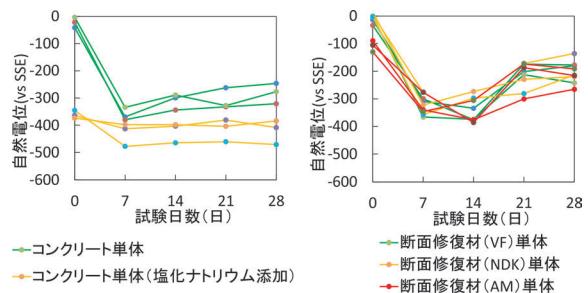


図9 コンクリート単体と断面修復材単体の自然電位(塩水噴霧試験)

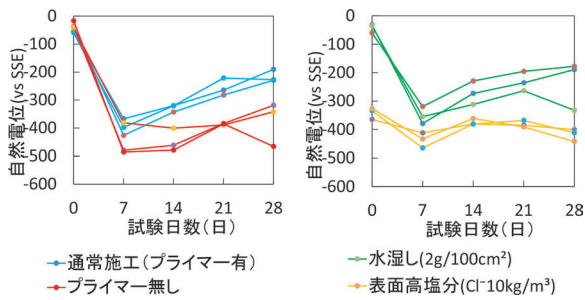


図 10 断面修復材 (VF) を用いた試験体の自然電位 (塩水噴霧試験)

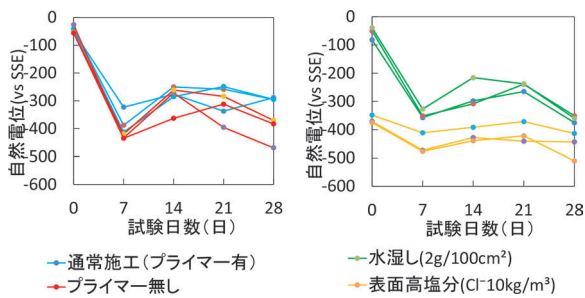


図 11 断面修復材 (NDK) を用いた試験体の自然電位 (塩水噴霧試験)

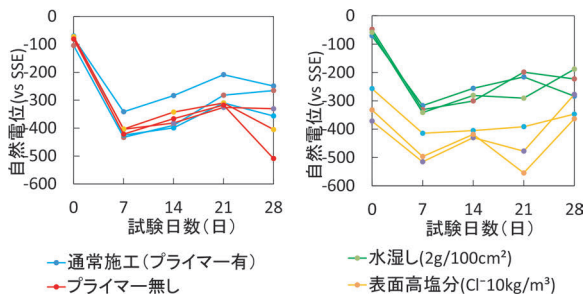


図 12 断面修復材 (AM) を用いた試験体の自然電位 (塩水噴霧試験)

3.4 中性子線イメージング試験用試験体 B の一面浸漬時の質量変化

試験体 B の一面浸漬における質量変化の測定結果を図 13 に示す。コンクリート単体と比べて、断面修復材単体では質量変化率が小さい。また、プライマー施工の有無による明確な差はみられなかった。これは、3.2 節と同様の傾向である。

3.5 試験体 B の中性子線イメージング

図 14 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、①コンクリート単体と② NDK (有機系の断面修復材) 単体を比較すると、コンクリート単体では浸漬時間の経過により徐々に水分が浸透する様子がみられ、72 時間後には全

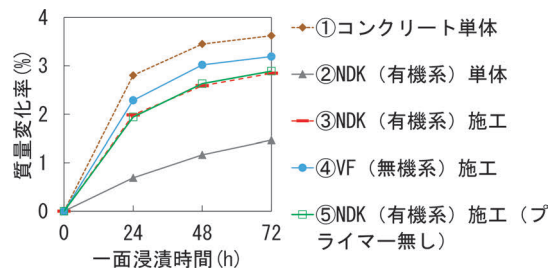


図 13 試験体 B の質量変化率

体に水分が浸透したが、② NDK (有機系) 単体ではコンクリート単体と比べて水分浸透が抑制されていることがわかる。この結果は、図 13 における水分浸透による質量変化の結果と一致している。ここで、断面修復部への水分浸透を考えると、断面修復材として広く使用されるポリマーセメントモルタルは、その構成材料としてポリマーなどの有機系材料を含むため、コンクリートと比較して母材自体が持つ水素量が多い。例えば、本試験では水と同等の水素密度を持つとされるアクリル樹脂がポリマー成分として含まれている。そのため、コンクリート側と比較して断面修復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線イメージングの結果より、ポリマーを多く含む断面修復材でも浸漬前後の差分を取ることで中性子線によるイメージングが可能であることがわかった。さらに、断面修復を模擬した、③ NDK (有機系の断面修復材) 施工、④ VF (無機系の断面修復材) 施工の結果からコンクリートには水分が浸透する一方、断面修復材には水分が浸透しにくい傾向は同様であった。また、有機系断面修復材と比べて無機系断面修復材への水分浸透が大きい、コンクリート単体より小さく、有機系、無機系共に界面からの水分の拡散は確認されなかった。加えて、鉄筋腐食のデータから推察される結果とは異なり、図 14 における③および⑤の比較からプライマー施工の有無による界面近傍の水分浸透状況に大きな違いはみられなかった。この理由として、母材コンクリートに対する断面修復材の施工が鉛直下向きであり、施工条件が比較的良好であったことや、母材のコンクリート側が弱材齢で水分を多く含むため界面でドライアウトを生じず、界面が密に充填されたことが考えられる。なお、⑤における試験体は、浅い部分において母材コンクリートが断面修復材側に入り込んでおり、黒色変色箇所は母材側のみであった。

以上、中性子線イメージングにより、断面修復箇所における水分挙動の時間経過に対応する可視化を試みた結果、コンクリートと断面修復材により水分浸透速度が大きく異なることや、断面修復材の種類によってもそれが異なること、また母材コンクリートに対する断面修復材

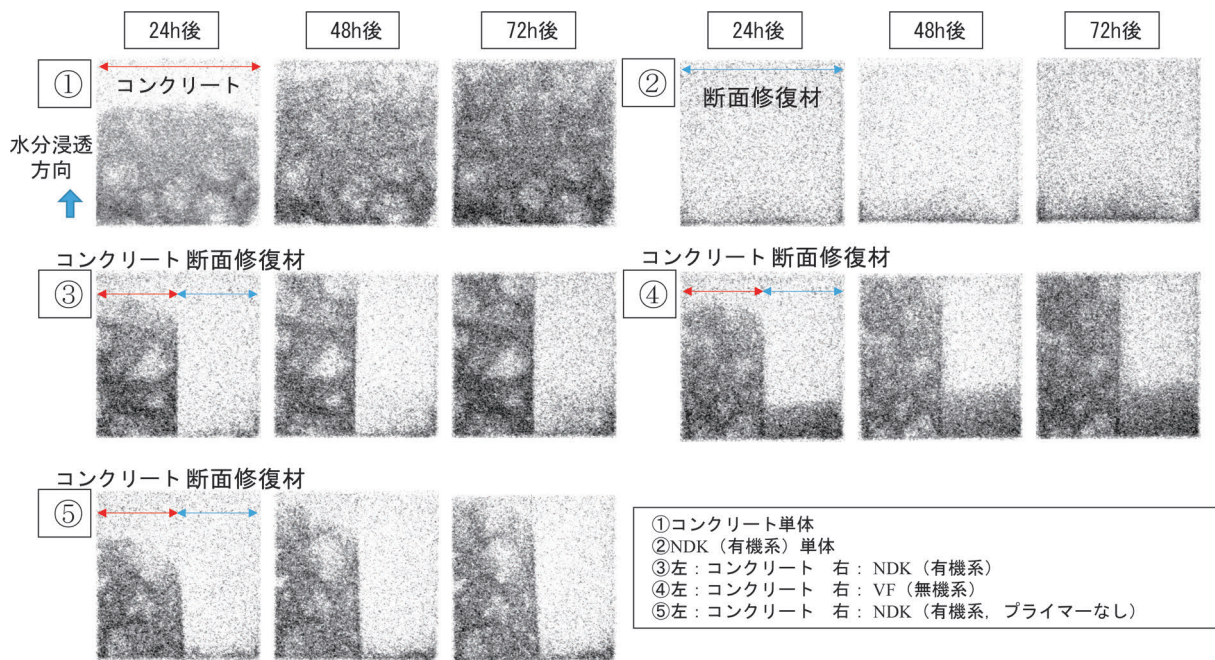


図 14 中性子線イメージングによる観察結果

の施工条件が比較的良好であった場合は界面付近への著しい水分浸透が生じないことがわかった。

合は界面付近への著しい水分浸透を生じないことがわかった。

4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 水分浸透に伴う質量変化量は、コンクリート単体に比べて、断面修復材ではコンクリートの約 1/8 程度と小さく、中性子線イメージングによる水分浸透試験からも断面修復材への水分の拡がり小さいことから、断面修復材の水分に対する物質移動抵抗性が高いことがわかった。
- (2) 母材コンクリートと断面修復材との界面をプライマーや水湿し等によって処理することで、施工状況の影響が少なく、界面における水分移動が抑制され、その結果、断面修復部における鉄筋腐食の進行を抑制できることが示唆された。
- (3) 中性子線イメージングにより時間経過に対する、断面修復箇所における水分挙動の可視化を試みた結果、コンクリートと断面修復材により水分浸透速度が大きく異なることや、断面修復材の種類によってもそれが異なること、また母材コンクリートに対する断面修復材の施工条件が比較的良好であった場

文 献

- 1) 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
- 2) 鈴木浩明, 上田洋ほか: 補修時のコンクリートの下地処理が断面修復材との界面の物質移動抵抗性に与える影響, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-157 pp.313-314, 2013
- 3) 吉村雄一, 水田真紀, 須長秀行, 大竹淑恵, 林崎規託: 中性子イメージングによるコンクリートへの浸透水分流束評価, 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, Vol.19, pp.379-384, 2019
- 4) 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, 2000.12
- 5) 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