

# 論文 中性子技術を用いた RC の腐食ひび割れの補修による鉄筋附着性能回復の検証

関根 麻里子\*1・鈴木 裕士\*2・兼松 学\*3

**要旨:** 本論文は、これまで難しいとされてきた鉄筋コンクリート内の健全および腐食した鉄筋、さらに腐食ひび割れに補修を施した鉄筋コンクリート内の腐食鉄筋の応力分布を工学材料回折装置を用いて精度良く測定し、中性子イメージング装置を用いた CT 撮影により試験体内部のひび割れ分布と補修材充填状態を確認した。検証の結果、腐食グレードによる附着応力度分布の変化を捉えることができた。また、腐食ひび割れに対して補修材を施工した場合、摩擦力の向上およびコンクリートの拘束効果の回復によって附着が回復することが確認された。

**キーワード:** 附着, 腐食鉄筋, ひび割れ, 補修, 樹脂注入, 中性子回折法, 中性子イメージング

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造(RC 造)に生じる劣化現象は多岐にわたり、特に鉄筋腐食は構造体として機能する鉄筋量を減少させるとともに鉄筋とコンクリートの附着性能を低下させるなど構造性能に及ぼす影響が大きい。鉄筋腐食の生じた部材の補修の生じた部材の補修は、補修材注入が行われるのが一般的であり、腐食抑制効果・附着性能回復が期待されているが、腐食による附着性能の変化、また腐食ひび割れの補修による附着特性の変化、また腐食ひび割れの補修による附着性能の回復程度は十分に明らかになっていない。

一般的に鉄筋応力の測定に用いられるひずみゲージ法は、鉄筋に貼付けたゲージの金属の抵抗値変化からひずみを測定する間接的な方法であり、鉄筋へのゲージの貼付け自体が鉄筋とコンクリートの間の附着に影響を与えてしまうことが懸念されていた。さらに、腐食鉄筋についてはゲージを表面に貼付けて測定する事が困難であるため、実験的には溝切部分や鉄筋内部にゲージを貼り付

けるなどの工夫がなされてきた<sup>1)2)</sup>。

腐食の非破壊診断については、電磁誘導加熱により変動するコンクリートの表面温度性状による診断<sup>3)</sup>や、X線を用いた腐食状態のイメージング<sup>4)</sup>などが行われてきたが、RC 造の腐食鉄筋応力の非破壊測定に至らなかった。

そこで、本研究では大強度陽子加速器施設(J-PARC)、物質・生命科学実験施設(MLF)内の工学材料回折装置 TAKUMI を使用して、鉄筋コンクリート内の腐食鉄筋および腐食ひび割れに補修を施した鉄筋コンクリート内の腐食鉄筋の応力分布測定を行った。TAKUMI は中性子線の回折現象を応用して材料深部の応力・ひずみを非破壊・非接触で測定することができる<sup>5)</sup>。

さらに J-PARC MLF 内の中性子イメージング装置 RADEN を用いて鉄筋コンクリート内部のひび割れ分布と補修材充填状態を確認することで、腐食鉄筋の附着特性と腐食鉄筋の補修における附着性能の回復を検証した。

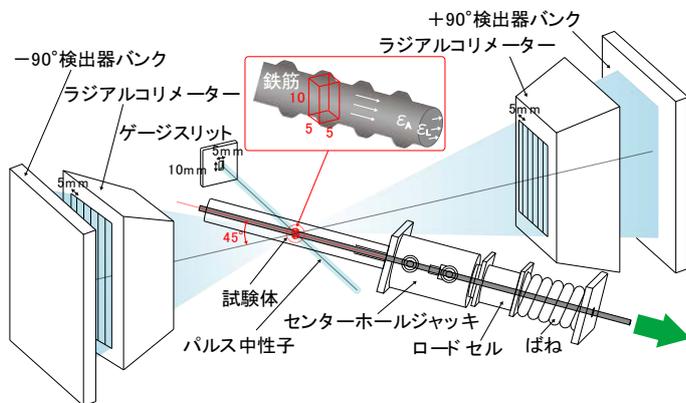


図-1 TAKUMI 測定概要図

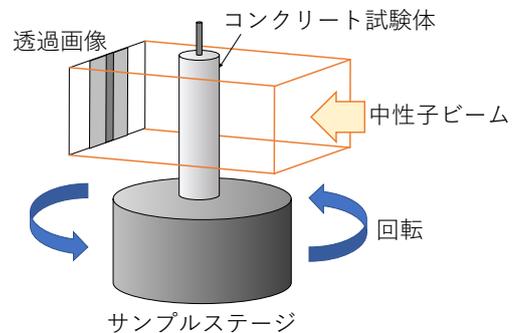


図-2 RADEN 測定概要図

\*1 東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

\*2 日本原子力研究開発機構

\*3 東京理科大学 理工学部 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

## 2. 研究概要

### 2.1 測定概要

#### (1) 鉄筋応力測定概要

本研究では J-PARC MLF における工学材料回折装置 TAKUMI を使用した。測定概要図を図-1 に示す。一般に、中性子回折法では「材料深部の応力状態を非破壊・非接触で測定することができる」とされる<sup>5)</sup>。

図-1 に示すように入射中性子線に対して鉄筋が 45° の向きになるように試験体を設置し、±90 度に配した検出器にて回折中性子線を測定した。鋼製フレームと油圧ジャッキにより試験体に引張応力を導入し、応力に対する回折スペクトルの測定を行った。この際、クリープの影響を極力低減するため鋼製ばねを付加している。導入応力は 30, 125, 250MPa の 3 水準とした。

中性子回折法は、中性子線の回折現象を利用して、測定領域内に収まる結晶の原子間距離の変化を捉える手法である。したがって、測定により得られた回折角と中性子強度の関係から、マルチピークフィッティングにより格子定数  $a_0$  を定め、式(1)により弾性ひずみを導出することができる。また、等二軸応力を仮定し、式(2)を適用して軸方向および半径方向の応力を測定した。測定領域中に収まる結晶に対するの結晶間距離の変化を捉える手法であると言える<sup>6)</sup>。

$$\varepsilon(x) = \frac{a(x) - a_0}{a_0} \quad (1)$$

$$\sigma_A(x) = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(1-\nu)\varepsilon_A(x) + 2\nu\varepsilon_L(x)\} \quad (2-2)$$

$$\sigma_L(x) = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{\varepsilon_L(x) + \nu\varepsilon_A(x)\} \quad (2-2)$$

ここで、 $\sigma_A$ ：軸方向鉄筋応力、 $\sigma_L$ ：半径方向鉄筋応力、 $\varepsilon$ ：弾性ひずみ( $\varepsilon_A$ :軸方向、 $\varepsilon_L$ :半径方向)、 $a_0$ ：無負荷時の格子定数( $a_{A0}$ :軸方向、 $a_{L0}$ :半径方向)、 $a$ ：載荷時の格子定数、 $E$ ：鉄筋のヤング率、 $\nu$ ：ポアソン比である。なお  $E$ 、 $\nu$ 、 $a_0$  は使用鉄筋の実測により求めた。

#### (2) 中性子 CT 概要

中性子 CT 撮影には J-PARC MLF における中性子イメージング装置 RADEN を使用した。装置概要図を図-2 に示す。中性子は、H や Li などの軽元素に対して透過しにくい性質をもっている<sup>8)</sup>。そのため水やプラスチックを選択的に観察でき、樹脂系補修材を見るのに適している。

本装置のビーム平行度は  $L/D=400$  ( $L$ : 中性子源から開口部までの距離、 $D$ : 開口部径)、画角は  $140 \times 140\text{mm}$  であり、本研究における空間解像能はおよそ  $68\mu\text{m}/\text{pixel}$  である。カメラは CCD カメラ(Andor 製、 $2048 \times 2048\text{pixel}$ )、レンズは Nikon 85 mm /  $f=1.4$  を使用し、 $0 \sim 180^\circ$  を  $1^\circ$  ごとに撮影した。試験体引張方向の端から  $100 \sim 140\text{mm}$  の範囲を撮影した。画像の再構築には VG Studio max 2.2 を用いた。

表-1 調査表及びコンクリート力学的性能

W/C (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )			AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (28 日) (GPa)	$f_c$ (28 日) (MPa)
			セメント	細骨材	粗骨材			
60	185	49	308	859	914	1541.7	51.63	37.40

表-2 試験体概要

試験体番号	腐食データ			鉄筋データ				
	腐食グレード	腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	積算電流量 (A・h)	鉄筋径	$E$ (GPa)	$\nu$	$a_{A0}$ (Å)	$a_{L0}$ (Å)
I	腐食無し	0	0	D10	202	0.296	2.867	2.867
II	腐食小	218.8	20.16		190	0.298	2.867	2.867
	腐食大	374.8*	34.56*		179	0.311	2.867	2.867
III	腐食大	375.1	34.56		203	0.261	2.867	2.866
	腐食大 / 補修				250	0.388	2.869	2.869

\*印加電流が安定しなかったためおおよその値

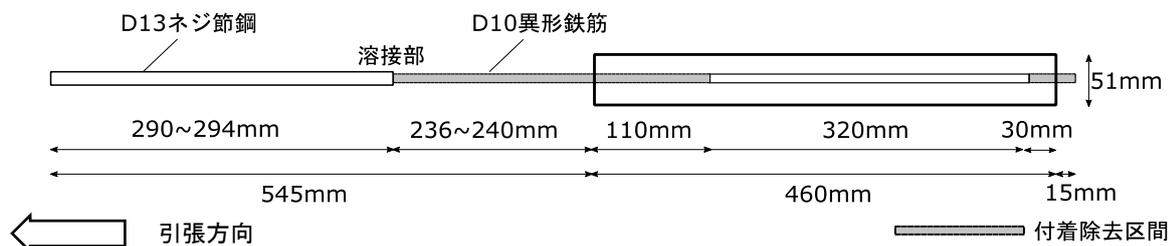
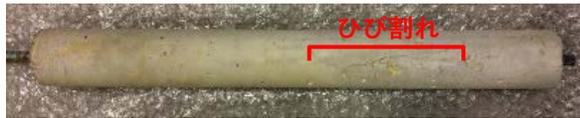
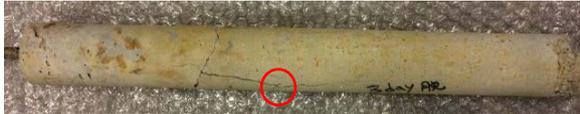


図-4 試験体概要図



試験体II (腐食グレード小)



○ : 補修材注入位置

試験体III (腐食グレード大・3方向)

図-5 電食後試験体外観と補修材注入位置



図-6 補修材注入状況

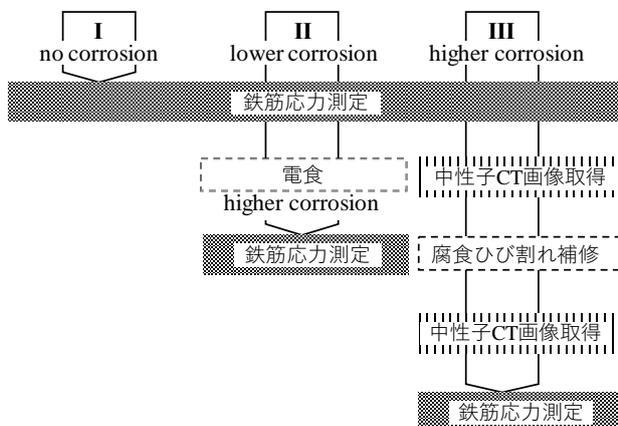


図-7 試験手順

## 2.2 試験体概要

試験体の調査表及びコンクリート力学的性能を表-1、試験体概要を図-4に示す。コンクリート母材のサイズはφ51×460mmであり、内部にはD10の異形鉄筋を配した。鉄筋を腐食しやすくするため、打設前に予め10%くえん酸二アンモニウム溶液に3日間浸漬させ、鉄筋表面の黒皮を剥ぐ前処理を行った。また、格子定数 $a_0$ を求める付着除去区間(引張側110mm, 逆側30mm区間)において、打設の際にシリコンチューブを巻き付け、打設後3時間でチューブを除去することにより、鉄筋とコンクリートの付着を除去した。さらに、付着除去区間の腐食を防止する目的で当該区間をエポキシ樹脂によりシールした。打設後72時間で脱型し、2週間水中養生を行った後、鉄筋を電食により腐食させた。腐食量は、式(3)に示すファラデーの法則により得た。

$$m = \frac{Q \cdot M_{Fe}}{n \cdot F \cdot S} \quad (3)$$

ここで、 $m$ :腐食量( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ),  $Q$ :積算腐食量( $\text{mA} \cdot \text{s}$ ),  $M_{Fe}$ :鉄の原子量, 55.845(g),  $n$ :鉄イオン価数, 2(mol eq.),  $F$ :ファラデー定数,  $9.65 \times 10^4$ (C/mol eq.),  $S$ :腐食領域の鉄の表面積( $\text{cm}^2$ )とする。

電食後の試験体外観を図-5に示す。電食後、12日間65°C環境下で乾燥を施し、TAKUMIにて鉄筋応力測定を行った。なお、電食期間中、他の試験体は20°C60%RH環境下で封緘養生を行った。3つの試験体I~IIIの腐食グレードはそれぞれ腐食無し、腐食小、腐食大の3段階とした。各試験体の腐食データおよび測定で得られた鉄筋データを表-2に示す。

各試験体の鉄筋応力測定を行った後、試験体IIの腐食グレードを電食により、腐食小から腐食大に促進させた。試験体II(腐食グレード小)および試験体III(腐食グレード大)の腐食ひび割れの様子を図-5に示す。腐食グレード小ではひび割れは1本、腐食グレード大では3本ひび割れが観察され、いずれのひび割れも鉄筋軸に沿って入っていた。腐食グレード大の試験体に関しては、最大ひび割れ幅が促進後の試験体IIは1.6mm、試験体IIIは1.8mmであった。

その後、試験体IIIの腐食ひび割れ部に補修材を注入し、鉄筋応力測定を実施した。補修材の注入前後で、RADENにて中性子CTを撮影した。補修材の注入位置を図-5内の丸で示す。また、補修材注入状況を図-6に示す。補修材はエポキシ樹脂系の2液混合型、硬質形中粘度形一般用(5000~20000 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )を使用した。各ひび割れの1~2カ所から専用の注入器を用い、ゴムの復元力によって補修材を注入した。ひび割れ部へのシーリングには剥離可能タイプを使用した。以上の試験体への処置、各測定等の試験手順は図-7に示す。

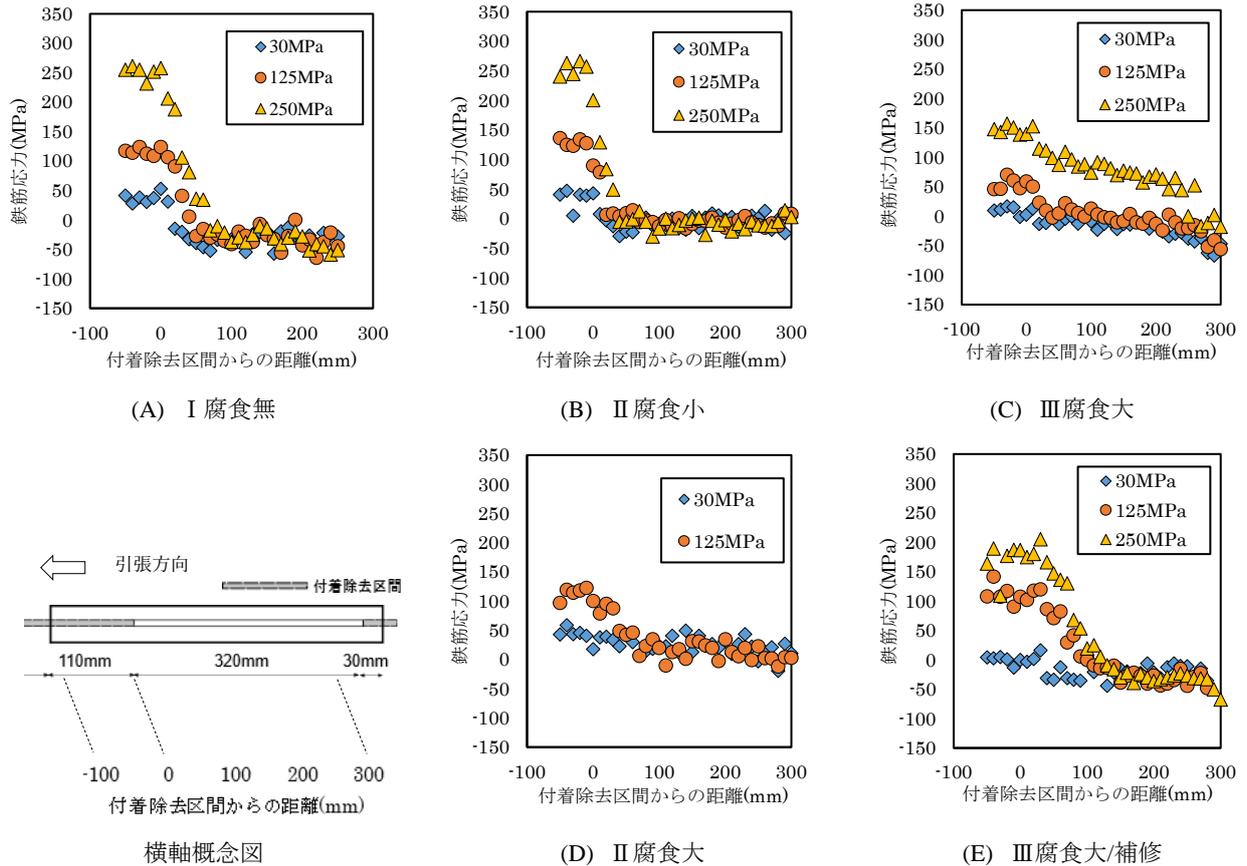


図-8 TAKUMI 鉄筋応力測定結果

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鉄筋応力測定結果

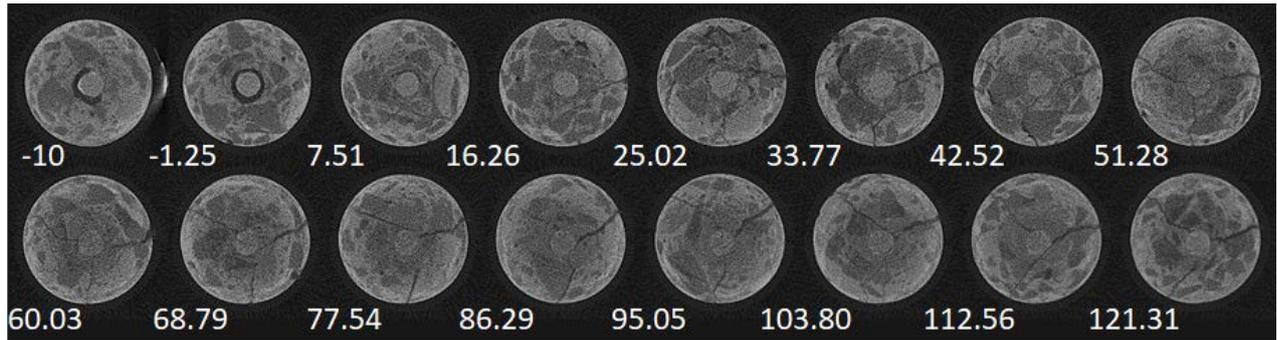
図-8(A)~(C)に試験体 I ~ III の鉄筋応力測定結果、(D)に試験体 II の腐食グレードを大にした際の鉄筋応力測定結果、(E)に腐食ひび割れに補修を施した試験体 III の鉄筋応力測定結果を示す。横軸は鉄筋の付着除去区間からの距離を示す。横軸の-100~0 は付着除去区間を示す。(A)から、付着除去区間では導入応力がコンクリートに伝達されず鉄筋に伝わっていることと 0mm 以上の付着区間ではコンクリートに応力が伝達し力を負担していることがわかる。付着除去区間の鉄筋応力が導入応力とほぼ同じとなり、中性子回折法を用いることで精度良く応力を測定できることが確認された。付着区間と付着除去区間の間の鉄筋応力分布の勾配が急であるほど付着力が大きく、以降この勾配を付着勾配とする。導入応力 250MPa の鉄筋応力測定結果について、sigmoid 関数で近似し、中央値の傾きから勾配の大きさを求めた。

(A)は付着勾配の大きさが4.83、(B)は-6.89 であり、(A)に対して付着勾配が大きくなった。(C)では付着除去区間の鉄筋応力が 150MPa 程度と導入応力に対して小さい値となった。(C)で示す試験体 III は付着除去区間において部分的に付着があることが試験体外観から確認された。導入応力の一部がコンクリートに伝達して鉄筋応力が小さ

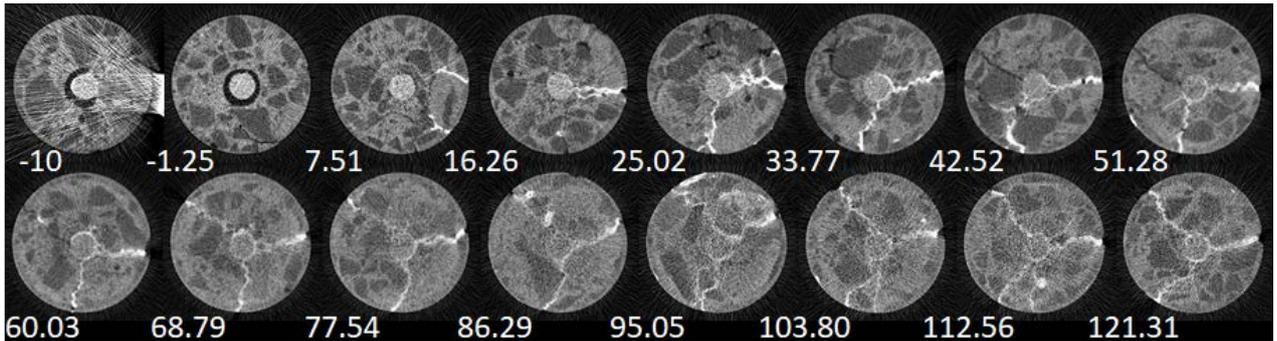
い値になったと考えられる。(C)の 50~250mm の範囲に注目すると 125MPa までは(B)と概ね同じ 0MPa 付近に応力が集中していたが、250MPa の応力を導入すると鉄筋応力は 100MPa 近傍まで大きくなった。このことから 250MPa の導入応力により付着が切れ、鉄筋に応力伝達するようになったと考えられる。鉄筋腐食による錆はある限度以内であれば噛み合い効果により付着強度を増加させるが、縦ひび割れが入るとコンクリートの拘束効果が低減し、付着強度を低下させると報告されている<sup>9)</sup>。このことから(B)では錆による付着強度の増加、(C)では大きな腐食ひび割れにより 250MPa の導入応力でコンクリートの拘束効果が失われたと考えられる。

(D)は引張時に鉄筋が抜ける恐れがあったため 250MPa の導入応力での測定は行わなかった。測定結果は同程度の腐食グレード・ひび割れである(C)と同様の傾向を示し、勾配の傾きから付着強度は低いものの、125MPa までは大きな腐食ひび割れがあっても拘束力が働いていることが確認された。

(E)は腐食ひび割れに補修を施したものであり、補修前の(C)と比較して勾配が大きくなった。(E)の付着勾配の大きさは-2.98 となり(A)ほどではないが勾配の大きさは近く、補修により付着性能が腐食前に近い状態まで回復したことが示された。



補修前 試験体断面(付着除去区間からの距離 mm)



補修後 試験体断面(付着除去区間からの距離 mm)

図-9 試験体Ⅲ CT画像

### 3.2 中性子 CT 撮影結果

試験体Ⅲの腐食ひび割れ補修前後の CT 撮影により補修材の充填状態を確認した。図-9 上段に補修前、下段に補修後の CT 画像を示す。数字は付着除去区間からの距離を示し、各画像は試験体の断面である。

-10, -1.25mm の試験体の鉄筋周辺に見られる黒い部分が付着除去部分である。-1.25~7.51mm 間の画像を確認すると、付着除去部分が 0mm まででなく 7.51mm 手前まで続いていた。そのため完全に付着区間となるのは 7.51mm 以降である。また、-10mm では鉄筋外周の半分ほどが付着しており、試験体外観から確認した通り本来の付着除去区間において部分的に付着があった。

補修前の断面画像から、完全な付着区間となる 7.51~16.26mm の範囲では試験体内部のひび割れは試験体断面右下方向に 2 本あり、25.02mm 以上からは試験体断面左上方向への 1 本を加えた計 3 本のひび割れが放射状に入っていることが確認できる。

補修後の画像の試験体ひび割れ部の中で白く映る部分が補修材を示す。補修材は付着除去区間からの距離 25.02mm 付近から鉄筋周りの腐食による微小な隙間まで充填され、68.79mm からは 3 本すべてのひび割れに補修材が充填された。図-8(C)より、補前の鉄筋応力は 50~250mm の範囲において 250MPa の導入応力で付着が切れた。図-8(E)より、補修後は 100~270mm の範囲において鉄筋応力が 0MPa 近傍となり付着が回復したことが

わかる。補修材が鉄筋とコンクリートの間の隙間に充填され摩擦力による付着強度が発生したこと、腐食ひび割れによってコンクリートの拘束効果が失われていたのが、十分に充填された補修材により復活し付着強度として表れたと考えられる。

### 4. 結論

本研究では、工学材料回折装置を用いて腐食鉄筋および補修材が鉄筋コンクリート中の付着特性に与える影響を非破壊に測定し、中性子イメージング装置を用いた CT 撮影により、試験体内部のひび割れ分布と補修材充填状態を確認し、腐食鉄筋における付着特性と補修材による付着性能の回復の検証を行った。

本研究で得た知見を以下に示す。

- 1) 工学材料回折装置を用いて RC 内の腐食鉄筋の応力を精度良く測定することができ、腐食グレードによる付着応力度分布の変化を捉えることができた。
- 2) RC 内の腐食鉄筋について腐食グレードの小さい試験体では錆による摩擦力により付着強度が増加したと考えられる。
- 3) RC 内の腐食鉄筋について幅 1mm 以上の縦ひび割れが入った腐食グレードの大きい試験体はコンクリートの拘束効果が失われ、付着強度の低下に繋がる様子が確認された。
- 4) 腐食ひび割れに補修を施した RC 内の腐食鉄筋につい

て付着性能が大幅に回復することが確認された。

5) 中性子イメージング装置の CT 撮影により RC 内部のひび割れ・補修材分布を得ることができた。補修を施した RC 内の腐食鉄筋の付着回復の理由として補修材による摩擦力の向上とコンクリートの拘束効果の回復が考えられる。

#### 謝辞

本研究は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の 2013 年度および 2017 年度 MLF 利用成果公開型実験 (課題番号 2013B0096 代表 鈴木裕士博士, 課題番号 2017A0156 代表 兼松学教授, 課題番号 2017A0157 代表 兼松学教授) として実施した。本研究の実施にあたり、東京理科大学小山拓氏、西尾悠平助教、日本原子力研究開発機構甲斐哲也博士、松本吉弘博士、篠原武尚博士、ステファヌス ハルヨ博士、ほか多くの協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所付着応力一局所すべり関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.663-668, 1991
- 2) 村上祐貴ほか: 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 17 巻, 第 1 号, 2006 年 1 月

- 3) 大下英吉ほか: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいた RC 構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, 2009.2
- 4) 秋山充良, 中嶋啓太, 小森谷隆: X 線撮影を用いた RC 部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第 22 巻, 第 3 号, 2011 年 9 月
- 5) ステファヌス ハルヨ, 相澤一也, 伊藤崇芳, 有馬寛: 匠を用いた工学回折研究, 中性子回折の基礎と応用, RADIOTOPES, Vol.59, pp 615-622, 2010
- 6) 兼松学, 野口貴文, 安田正雪, 鈴木裕士: 残留応力解析用中性子回折装置(RESA)による鉄筋応力の非破壊測定, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.2, pp.775-780, 2008
- 7) ISO/TS 21432:2005 Non-destructive testing -- Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction
- 8) 鬼柳善明: 中性子と物質の相互作用, 中性子イメージング技術の基礎と応用, RADIOTOPES, Vol.56, pp211-217, 2007
- 9) 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, pp.139-144, 1991