

論文 中性子回折法を用いたひび割れ近傍における鉄筋応力の非破壊測定手法の開発に関する実験的研究

兼松 学^{*1}・太田 匠美^{*2}・鈴木 裕士^{*3}・野口 貴文^{*4}

要旨: 非破壊測定技術の一つである中性子回折法を測定原理とした中性子応力測定装置 (RESA-1) を用いて、鉄筋応力の非破壊測定手法の開発を目的として一連の実験を行った結果、中性子カウント数を考慮することで、より精緻な測定が可能であることを示した。また、溝切鉄筋にひずみゲージを貼付し、付着に影響を与えずに測定したコンクリート中の鉄筋応力分布と比較した結果、RESA の測定値により同様の傾向を示すことを確認した。また、RESA による測定結果は、溝切鉄筋による測定結果に比べて応力の変動が大きい結果となったことから、鉄筋とコンクリートの界面の状態との関係について考察した。

キーワード: ひずみゲージ法, ひび割れ, 中性子回折法, RESA

1. はじめに

材料のひずみ値を測定する場合、ひずみゲージ法が用いられることが多く、鉄筋コンクリート構造物に使用されている異形鉄筋のひずみ測定にもこの手法が用いられている。ひずみゲージ法は取り扱いが簡単であり高い精度でひずみ値を測定できるが、コンクリート中の鉄筋応力を測定するには、ひずみゲージの防水加工により測定箇所をビニールテープで覆ってしまうことで鉄筋とコンクリートとの付着が損なわれることが懸念される。そのため、溝切鉄筋を用いて付着への影響を最小限にした測定が試みられているが、鉄筋の断面自体が変わってしまう点が問題点として挙げられる。

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れは、鉄筋の節から発生する場合があります¹⁾、その場合、ひび割れ発生部の付着が破壊されていることが明らかとなっている。そのため、ひずみゲージ法を用いた応力測定では、ひずみゲージの設置によって、鉄筋とコンクリートとの付着が損なわれ、鉄筋とコンクリートが完全に付着している状態の応力測定をすることは困難であった。

応力測定技術には、前述のひずみゲージ法の他に、金属結晶の格子面間隔を標点間距離とする物理的な計測法があり、材料内部の応力値を非破壊非接触で測定可能であり、鉄筋コンクリート分野への応用がこころみられている^{2, 3, 4)}。

著者ら²⁾は、コンクリートに埋設された鉄筋応力の非破壊測定手法の開発を目指し、中性子応力測定装置 (Neutron Diffractometer for RESidual Stress Analysis : 以下 RESA) を用いて、異形鉄筋のみを測定した結果、高い精度でひずみ値を測定可能であることを示した。また、

鉄筋軸方向に穴を開けたコンクリートで遮蔽した試験体についても、鉄筋のみの測定と同様の精度で測定可能であった。しかし、鉄筋とコンクリートが付着した状態で応力測定を行った結果、応力値の測定が可能であることを示したものの、応力の傾向を十分確認することはできなかった。西川ら⁵⁾は、両引きの鉄筋コンクリート試験体を用いて同様の実験を行い、ひび割れ発生による鉄筋応力の上昇を捉えることに成功している。

そこで、本研究では、RESA によるコンクリート中の鉄筋応力を測定する手法の開発を念頭に置き、RESA を用いて、ひび割れ近傍の応力の完全非破壊試験による測定を目的として、一連の実験的研究を実施した。

RESA による応力測定の際に、鉄筋とコンクリートとの付着を阻害しないように、鉄筋に溝切加工を施し、溝内にひずみゲージを貼付した試験体による応力測定も行った。RESA による応力測定ではより精緻な応力測定を行うため、中性子カウント数を増やす目的でゲージボリューム(後述)を大きくし、バックグラウンドのノイズを減少させる目的で使用する回折角(θ_0 : 後述)を変更した。また、想定される誤差について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体仕様

表-1 コンクリートに使用した材料

セメント	普通ポルトランドセメント：強度 61.3N/mm ² , 密度 3.15
細骨材	大井川産陸砂：密度 2.58
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石：密度 2.65
混和剤	AE 減水剤

*1 東京理科大学 理工学部 建築学科准教授 工博 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻修士課程 (非会員)

*3 (独) 日本原子力研究開発機構 量子応用研究部門 中性子残留応力解析研究グループ 工博 (非会員)

*4 東京大学 大学院工学研究科 建築学専攻准教授 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの調合

水セメント比 [%]	単位水量 [kg/m ³]	単位セメント量 [kg/m ³]	単位細骨材量 [kg/m ³]	単位粗骨材量 [kg/m ³]	AE 減水剤 [ml]	細骨材率 [%]	目標スランプ [cm]	目標空気量 [%]
55	170	309	698	1101	1082	40	18.0	4.0

表-3 試験体概要

試験体名	鉄筋		コンクリート			寸法 [mm]	試験体仕様 * ひずみゲージ@2.5mm ■ ガドリニウム塗付域
			力学的性能	28日標準 [N/mm ²]	追随 [N/mm ²]		
SG-A	As	114.7	f_c	44.8	40.6	70×70×400	
	ρ	2.40	f_t	2.6	2.6		
	溝	○	$E_C \times 10^4$	2.99	3.18		
SG-B	As	114.7	f_c	44.2	41.7	50×100×400	
	ρ	2.35	f_t	3.2	3.2		
	溝	○	$E_C \times 10^4$	3.29	3.11		
R-A	As	126.7	f_c	39.6	38.4	70×70×400	
	ρ	2.65	f_t	2.8	2.3		
	溝	×	$E_C \times 10^4$	3.15	2.00		
R-B	As	126.7	f_c	39.6	38.4	50×100×400	
	ρ	2.60	f_t	2.8	2.3		
	溝	×	$E_C \times 10^4$	3.15	2.00		

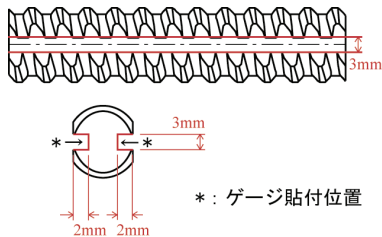


図-1 溝切鉄筋

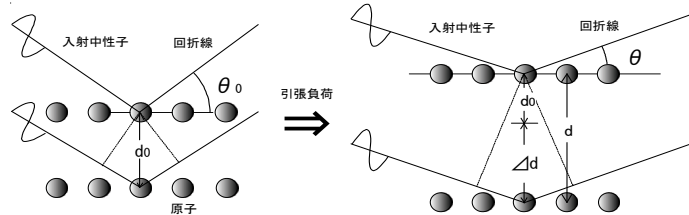


図-2 格子面間隔の変化

応力測定実験はひずみゲージ法と中性子回折法の2種類を行い、ひずみゲージ法による応力測定実験を行った試験体をシリーズ SG、中性子回折法による応力測定実験を行った試験体をシリーズ R とした。使用した材料を表-1 に、用いたコンクリートの調合を表-2 に示す。また、コンクリートの強度試験はφ100×高さ 200mm の円柱供試体を用いて行った。

試験体の概要およびコンクリートの力学的性能を表-3 に示す (As は鉄筋断面積, ρ は鉄筋比 (= (鉄筋の公称断面積) / (試験体断面) とする))。シリーズ SG は、打設後 24 時間で脱型し、試験体の周囲をアルミテープで巻き、4 週間封緘養生を行った。シリーズ R は、4 週間の封緘養生を行った後、開放し、4 週間の 65℃乾燥、1 週間の 105℃乾燥を施した。シリーズ SG、シリーズ R のコンクリート中央部には、断面積が 8 割となるようにノッチを設け、予めひび割れを制御した。

シリーズ SG、シリーズ R と同様のコンクリートを用いて、角柱試験体 (寸法: 100×100×400mm) を作成し、角柱試験体表面の収縮量を、コンタクトゲージ (検長: 300mm) を用いて測定した (JIS A 1129-2 に準拠)。応力測定に用いた試験体と同様の養生を施し、収縮量を測定

した結果、シリーズ SG では、変化がほとんど見られなかったが、シリーズ R の収縮量は 765 μ ひずみであった。

中性子は水素原子に当たると散乱するという性質を持っており、シリーズ R は中性子の透過を促進させるため、測定直前に内部温度 105℃の乾燥炉に投入し、コンクリート内部の自由水をできる限り除去した。

実験に用いた試験体について、使用した鉄筋は、市販の高張力ねじ棒鋼 (SD345, D13, 節間隔 7.0mm, JIS G 3112 準拠) を用い、シリーズ SG に関しては鉄筋の軸方向に幅 3mm×深さ 2mm の溝切加工 (図-1) を施し、溝切部分にひずみゲージを貼付することで鉄筋とコンクリートとの付着に与える影響を最小限に留めた。ひずみゲージの測定部およびリード線にトップコートを塗り、さらに、溝切部分をエポキシ樹脂で埋め、防水処理とした。本研究で用いたひずみゲージは、溝切部分に貼付するため、測定部分が 2.0×0.9mm² のサイズを用いた。

シリーズ R は、RESA で測定する際に位置を決めるため、試験体の両端部から 50mm の位置に、中性子線を吸収する性質を持つ、ガドリニウム (元素記号: Gd, 元素番号 64) をエポキシ樹脂に混ぜ、幅 1mm で鉄筋表面に塗布した。

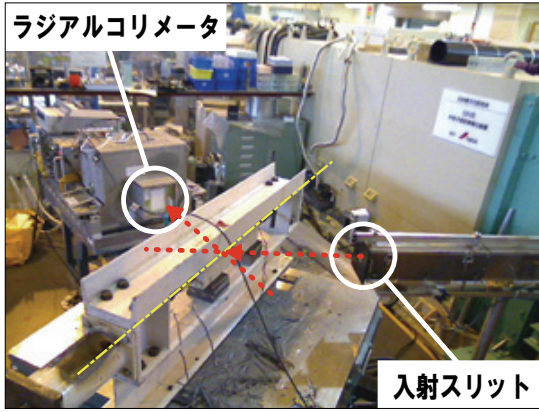


写真-1 RESA 装置概観

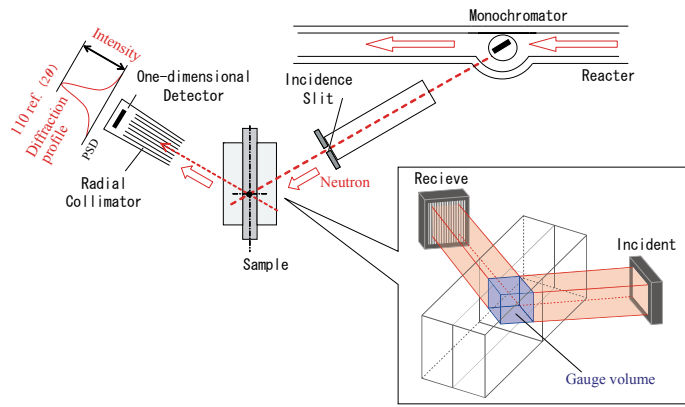


図-3 RESA 測定概念

2.2 RESA 原理⁷⁾

本研究では、中性子回折法による応力測定実験に日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置されている RESA を用いた。装置の概観を写真-1 に示す。

中性子回折法の測定原理は、X 線回折法と基本的に同様であり、X 線や中性子線は個々の原子に当たると散乱する性質を持っており、式(1)のブラッグの回折条件式を満たす場合に、散乱した中性子線が干渉し合い、回折現象を生じる。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 d : 格子面間隔

θ : 回折角

n : 回折次数 (1, 2, 3, …)

λ : 入射中性子線の波長

材料に負荷を加える前後での、結晶格子の変化を図-2 に示す。負荷を加えると結晶格子の格子面間隔が変化し、これに伴って回折角も変化する。格子面間隔の変化量を Δd として式(1)を微分すると、式(2)が得られる。

$$\frac{\Delta d}{d} = -\theta \cdot \cot \theta \quad (2)$$

これは、回折角の変化を測定することで格子ひずみが評価可能であることを意味し、無負荷状態の回折角を θ_0 、格子面間隔を d_0 とすると、格子ひずみ ε は式(3)で表される。

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d} = \frac{2\theta - 2\theta_0}{2} \cdot \cot \frac{2\theta}{2} \quad (3)$$

したがって、RESA を用いて回折角を測定することにより、材料中のひずみ値を非破壊非接触で測定することが可能となる。

RESA の概要を図-3 に示す。研究用原子炉から単一波長の熱中性子線を取り出し、入射スリットのサイズを変えることにより中性子線量を調節して材料に照射する。材料で反射した中性子線はラジアルコリメータを通して、一次元検出器によって測定される。この検出器ではどの角度に中性子が何回検出されたかを測定してお

り、回折角度と回折強度（中性子検出カウント数）との関係がガウス分布に従うものとして、測定結果をフィッティングし、ピーク回折角 2θ を得る。

実際に RESA で測定している範囲は図-3 に示す四角柱であり、これをゲージボリュームと呼ぶ。また、格子ひずみはこの四角柱全体の平均値として算出され、このひずみ値に測定に用いた回折面(110 回折面)の弾性係数 $2.55 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ を乗じることで、応力を算出した⁸⁾。

なお本研究では、中性子線の波長は 1.99 \AA であり、入射スリットサイズには $5.0 \times 10 \text{ mm}^2$ を使用した。

3. ひずみゲージ法による応力測定

3.1 溝切鉄筋の有効性

シリーズ SG, シリーズ R に用いた鉄筋は、溝切加工の有無のみ異なっている。鉄筋の溝切加工によって本来の性能が発揮されない可能性があるため、溝切鉄筋と溝切加工のない鉄筋（溝なし鉄筋）について引張試験を行い、性能の評価を試みた。試験結果を図-4 に示す。鉄筋の弾性係数は、シリーズ SG が $1.96 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、シリーズ R が $1.74 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であり、両者には 1 割程度の差が確認された。溝切鉄筋の弾性係数が高い値を示しているのは、断面形状の差に加え、製造時に生じる鉄筋断面内の物性の差が、部分的な切削加工により影響を受けたためと考えられる。従って、以降の応力の算定では、埋設前にあらかじめ測定した弾性係数を用いるものとした。

3.2 測定結果

表-3 に示す形状の試験体を、図-5 の拘束治具を用いてセンターホールジャッキにより載荷した。また、ばねを挟むことで、クリープによる応力緩和を低減させた³⁾。さらに、偏心を避けるため球座を用いた。載荷は、ロードセルの値を読みながら、毎分 10 N/mm^2 の速度で行い、裏表に貼付したひずみゲージの平均値をひずみ値として応力分布を得た。

シリーズ SG は 4 週まで封緘養生で 105°C 乾燥を行っ

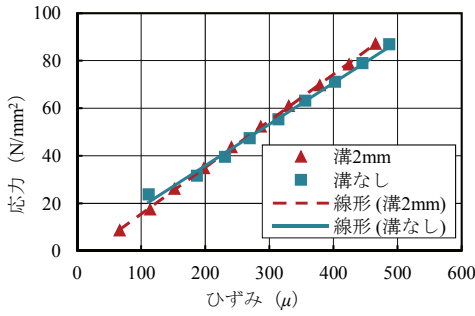


図-4 溝切鉄筋の応力ひずみ関係

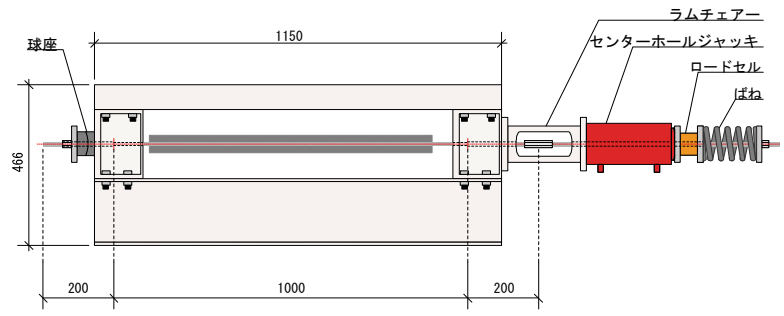
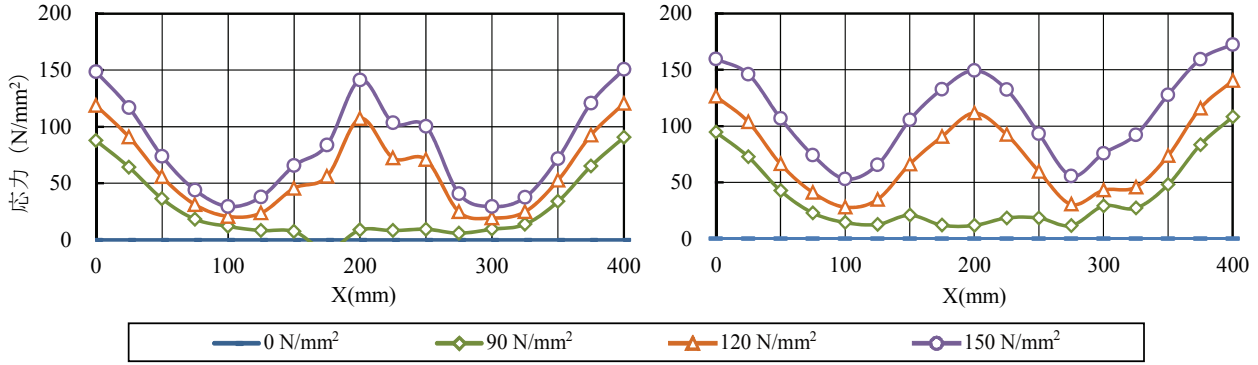


図-5 拘束治具概要



(a) SG-A 応力分布

(b) SG-B 応力分布

図-6 ひずみゲージによる応力分布

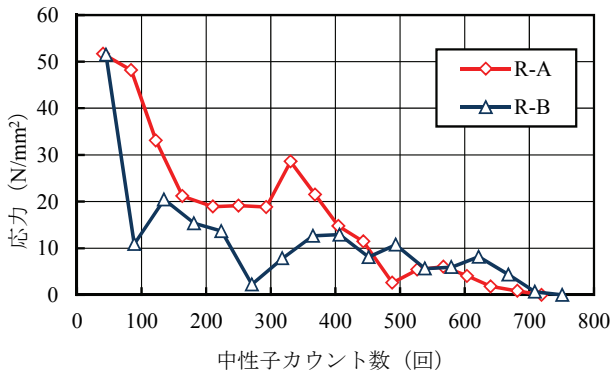


図-7 真値との応力差と中性子カウント数の関係

ていなかったため、前述した角柱試験体（寸法：100×100×400mm）により得られた収縮はほぼ 0 であった。そこで、ここでは、無載荷状態を 0 N/mm² として、応力を算定した。測定結果を図-6 に示す。図-6 において、120 N/mm² で試験体中央（X=200mm）のノッチ部分に急激な応力上昇がみられ、試験体表面ではひび割れが確認できていることから、ノッチによるひび割れの制御ができていると考えられる。また、試験体端部と中央部分では載荷応力と同じ応力値を示しており、ひずみゲージによる測定値の精度が良好であると考えられる。

4. 中性子回折法による応力測定

4.1 誤差の検討

RESA を用いて鉄筋応力測定をする場合、①フィッティングにより生じる誤差、②装置自身の誤差、③鉄筋の

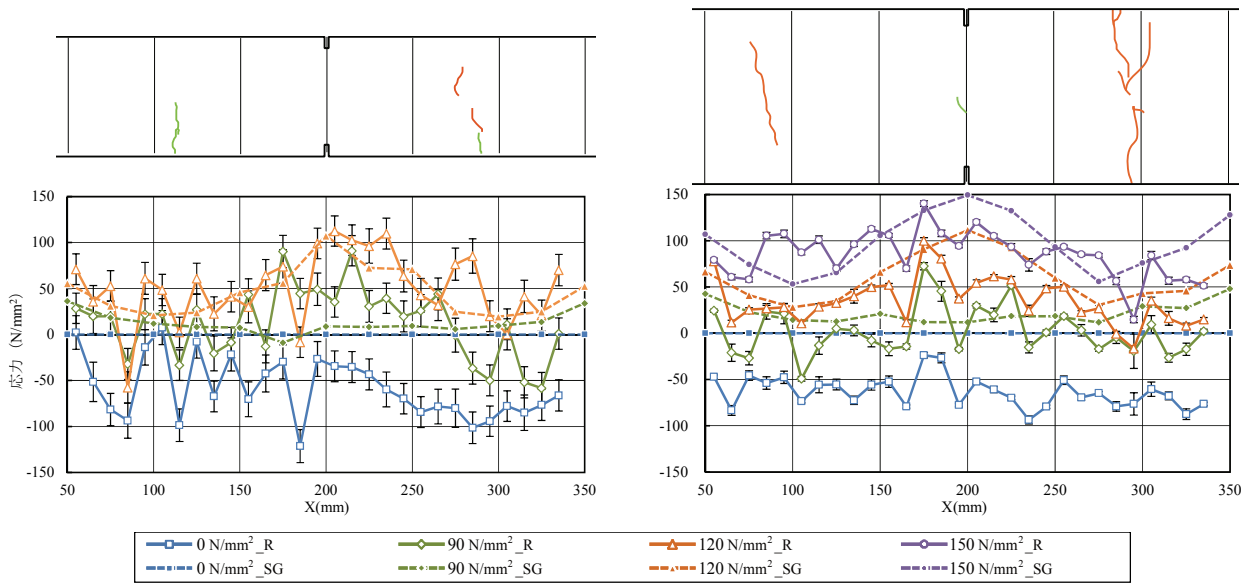
ばらつきにより生じる誤差が考えられる。西川ら⁶⁾ はこれらの誤差の検討を行っており、それぞれの誤差は 5 N/mm² 以下であると報告している。しかし、これらは鉄筋のみの場合における測定結果から算出しており、コンクリートで覆われている場合には、必ずしもこの通りであるとは言えない。鉄筋のみの測定では、中性子カウント数が平均して 500 回以上であるが、コンクリートに覆われている場合では 100 回前後であり、バックグラウンドのノイズが大きく、無視できない誤差が生じていると考えられる。

本研究では、より精緻な応力測定を行うため、中性子カウント数による誤差を検討した。無載荷状態で、R-A は 5 分の計測を 18 回、R-B については 2 分の計測を 17 回行った。ここで、測定結果が安定傾向を示す 700 回カウント時の応力値を比較用の真値と仮定し、真値との応力差と中性子カウント数との関係を図-7 に示す。R-A では 200 カウント付近で真値に近づき、さらに、500 カウント以上となると真値との差がほとんど見られなくなった。R-B では 100 カウント付近で真値に近づき、300 カウントを超えると再び真値に近づく傾向を示した。

4.2 測定結果

(1) 応力分布

中性子カウント数の検討から、500 カウント程度あれば真値に近づくことが示されたが、R-A の場合は、一点の測定時間が 1 時間を超えてしまい、著しく少ない測定点数しか得られなくなるため、200 カウントを下限値と



(a) R-A 応力分布 (b) R-B 応力分布
 図-8 RESA による応力分布とひび割れ図 (ひび割れ図は4面を重ねて表示)

して、10mm 間隔で測定を行った。

また、本研究では、引張負荷による鉄筋の軸方向の伸びを考慮するため、引張載荷後、RESA により鉄筋の軸方向をスキャンすることでガドリニウムを位置を算定し、載荷応力レベル毎に測定座標を設定した。

RESA で得られた回折角 2θ を用いて応力値を算出する場合には、無応力状態の回折角 $2\theta_0$ が必要となるため、シリーズ R で使用している鉄筋と同じ性能を持った鉄筋を RESA により測定した。鉄筋のみを 0, 100, 200, 300 N/mm^2 と、4 段階の応力レベルまで載荷し、線形近似した時の切片を $2\theta_0$ とした。その結果、相関係数は 0.9904 であり、 $2\theta_0$ は 58.8504° となった。

載荷応力レベルは、R-A が 0, 90, 120 N/mm^2 の 3 応力レベルであり、R-B は 0, 90, 120, 150 N/mm^2 の 4 応力レベルとした。R-A および R-B の測定結果を、それぞれ、図-8 (a), (b) に示し、試験体表面のひび割れ図をグラフ上部に合わせて示す。また、図中のエラーバーは、各測定点の中性子カウント数と図-7 との関係から算出した。

R-A について、 $X=50$ から 200mm の範囲では応力レベルが上昇すると、測定応力も同様の傾向を保持したまま上昇しており、R-B についても同様の傾向を読み取ることができるため、コンクリートと鉄筋が付着した状態においても鉄筋応力の傾向を捉えることが可能であると思われる。

また、R-A の $X=280\text{mm}$ 付近においては 90 N/mm^2 から 120 N/mm^2 へ載荷応力を引き上げた時点、R-B の $X=100$ mm 付近では 120 N/mm^2 から 150 N/mm^2 へ引き上げた時点において、RESA による測定応力が急激に上昇する現

象が確認された。これは、載荷によりひび割れが発生したものと考えられる。表面のひび割れ図を見ると、同じ位置にひび割れが発生しており、ひび割れ近傍の応力上昇を概ね捉えられていると考えられる。

載荷応力レベルが 120, 150 N/mm^2 のとき、R-A, R-B の測定値は、ひずみゲージによる測定値と似た傾向を示しているが、0, 90 N/mm^2 については、ひずみゲージによる測定値と差が見られる。これは、シリーズ SG とシリーズ R の養生条件が違うことが影響していると考えられる。0 N/mm^2 での RESA による測定値が、全体的に圧縮となっている。また、乾燥による影響で、 $X=200\text{mm}$ の位置にひび割れが生じている。

これは、急激に試験体を高温乾燥させたことで、鉄筋の節近傍では付着破壊が存在している可能性があり、RESA による測定値の上下がひずみゲージと比べて大きく、試験体内部では複雑なひび割れ性状が存在していることが考えられる。金津⁹⁾ は、既往の実験データをもとに、100°C を超える温度条件下における、コンクリートおよび鉄筋の物性を評価しており、コンクリートの圧縮強度および引張強度が低下する傾向にあると報告している。着強度についても同様の傾向にあるとしている。RESA による測定では現時点では、含水率の高い同仕様の試験体の測定が難しいことから、乾燥前の応力状態の検討は以降の課題としたい。

(2) 内部ひび割れの可視化

実験後、内部のひび割れについて可視化を行った。コンクリート内部のひび割れ評価を試みた研究は幾つか報告されており、ひび割れに赤インクを注入する方法¹⁾ や、ひび割れに造影剤を注入し X 線撮影をする方法¹⁰⁾

11), 蛍光塗料を用いる方法¹²⁾ などがあり, 本研究では, ひび割れ部分の判断が比較的簡単である, 蛍光塗料を用いてひび割れの可視化を行った。

R-A, R-B のどちらも, 試験体表面に発生したひび割れとほぼ同じ位置に内部ひび割れが確認できた。R-A の鉄筋下部を顕微鏡で撮影した画像のうち, 健全部とひび割れ発生部の一例を, 図-9 に示す。ひび割れ発生部では, ひび割れや気泡, 付着破壊などの損傷が見られ, 健全部では観察できなかった。

また, $X=50$ から 150mm の範囲では付着破壊が観察でき, $X=250$ から 350mm では健全な個所が多くみられた(図-10)。図-8 の応力分布において, $X=50$ から 150mm の範囲で応力値のピークが多いのは, 付着破壊によって鉄筋の応力負担が増えたことが原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究では, 中性子応力測定装置(RESA-1)を用いた, 鉄筋応力の非破壊測定手法の開発を目的とし, 一連の実験を行った結果, 以下に示す知見を得た。

- (1) RESA による応力測定では, 中性子カウント数を考慮することで, より精緻な応力測定が可能となり, 試験体中央部では, 溝切鉄筋を用いたひずみゲージ法による応力測定値とが概ね一致した。
- (2) 蛍光塗料を用いて可視化した付着破壊領域と RESA によって得られた鉄筋の応力分布には, 相関が見られた。

謝辞: 本研究の実施にあたり, 東京大学長井宏憲助教, 土屋直子氏, 東洋建設荒金直樹氏, 東京理科大学長縄美穂, 竹下彩の多大なる協力を得た。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85-100, 1980.2
- 2) 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
- 3) 楠 浩一, 椋山健二, 向井智久, 畠中雄一: 中性化した試験体を用いた中性子回折法による鉄筋と接着系あと施工アンカーの引張応力度分布に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.613-618, 2010
- 4) Hiroshi SUZUKI, Manabu KANEMATSU, Koichi KUSUNOKI: NEUTRON DIFFRACTION STUDIES

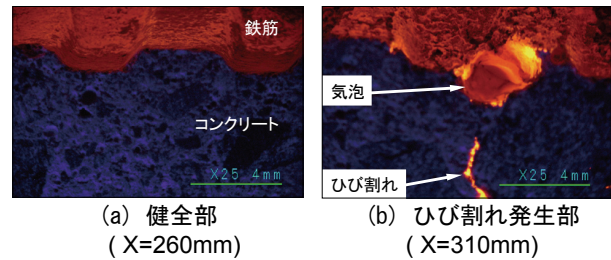


図-9 R-A 内部ひび割れ画像

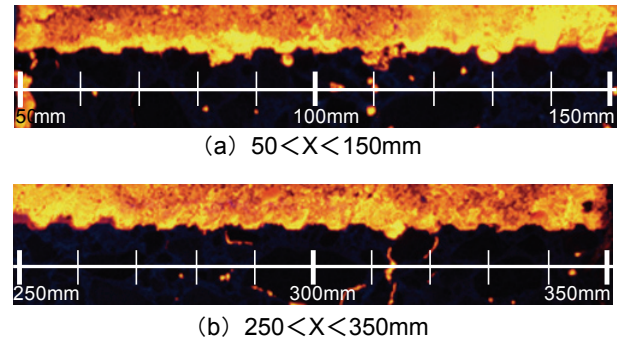


図-10 R-A 付着破壊領域

ON STRAIN EVALUATION OF REBAR IN REINFORCED CONCRETE, Powder Diffraction, vol.24, 2009

- 5) 日本建築学会報告書, 建築分野への中性子利用技術の応用に関する研究, 2010
- 6) 西川葉志乃, 兼松 学, 荒金直樹, 長井宏憲, 野口貴文: シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査 論文集, Vol.3, pp.285-290, 2009.8
- 7) 鈴木裕士, 菖蒲敬久: 中性子および放射光による残留応力測定とその相補利用, ふえらむ, Vol.11, No.11, pp.9-16, 2006
- 8) 鈴木裕士, T.M.Holden, 盛合 敦, 皆川宣明, 森井幸生: 中性子回折法による高張力鋼突合せ溶接材の残留応力評価, 材料, Vol.54, No.7, pp.685-691, 2005.7
- 9) 金津 努: 高温下におけるコンクリートおよび鉄筋の物性, 土木学会論文集, No.697, Vol.54, pp.13-24, 2002.2
- 10) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一: RC プリズムにおける自己収縮による微細ひび割れ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 11) 大塚浩司, 武田三弘: X 線造影撮影によるコンクリート構造内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究, 土木学会論文集, No.725, Vol.58, pp.143-156, 2003
- 12) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.11, 2004