

論文 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

兼松 学^{*1}・野口 貴文^{*2}・安田 正雪^{*3}・鈴木 裕士^{*4}

要旨：残留応力解析用中性子回折装置(RESA)は、格子面間隔を評点間距離とする物理的な測定方法であり、特に中性子線の高い透過力を生かすことでコンクリート内部の鉄筋応力を非破壊で測定することが可能であると期待されている。そこで本研究では、RESAを用いて鉄筋コンクリート中の鉄筋に生じている応力分布を非破壊的に測定する手法の開発を目的として一連の基礎的研究を実施した。その結果、本装置により十分高い精度で鉄筋応力の測定が可能であることを確認するとともに、鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の変動を有意に測定可能であることが明らかとなった。

キーワード：残留応力解析用中性子回折装置, RESA, 鉄筋応力, 非破壊測定

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の特徴は、圧縮に強いコンクリートと引張りに強い鉄筋を相補的に組み合わせた複合材料であるが、これら相補的關係は鉄筋とコンクリートの付着特性によって左右され、ひび割れ挙動や鉄筋コンクリート部材の特性に大きな影響を与える。

これまで、鉄筋の応力は鉄筋表面に箔ゲージを離散的に貼付することにより測定されることが一般的であった。しかしながら、ゲージ部の防水処理や配線の取り回しなどが付着特性に及ぼす影響は無視できないものと考えられており、鉄筋表面に溝を切ったり、内側をくり抜いた鉄筋内部にゲージを貼付するなどして、測定系への影響を最小限にとどめる努力が為されてきた。しかしながら、ゲージを用いた測定では、このように配慮したとしても、例えばひび割れ部の近傍など応力を直接測定することは困難であった。

そこで、本研究では、量子ビーム技術の一つである残留応力解析用中性子回折装置(Neutron Diffractometer for RESidual Stress Analysis: 以下 RESA)を用い、鉄筋コンクリート中の鉄筋応力を完全非破壊・非接触測定により測

定することを試みた。特に、本論文では、一般的な建築用鋼材を用いた基礎実験を実施するとともに、ひび割れ近傍における鉄筋の応力分布の測定を試み、中性子回折法の適用性を明らかにすることを目的とする。

2. RESA による測定の概要

2.1 装置概要

本研究における中性子回折残留応力測定は、全て(独)日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 を中性子線源とする熱中性子ポートに設置されている RESA を用いて実施した。

本装置は、研究炉より得られた中性子線を単一波長の中性子線(約 $\lambda \approx 0.159\text{nm}$ の固定波長)に制御して照射し、負荷をかける前後の中性子回折角度の差より材料内部の応力を算定するものである。同様の放射線測定技術である X 線を用いた残留応力測定に比べ、中性子の透過性が高いことを利用して、より深い部位の応力の測定が可能である。写真-1 に RESA の装置概観を、図-1 に装置概要を示す。



写真-1 RESA 概観

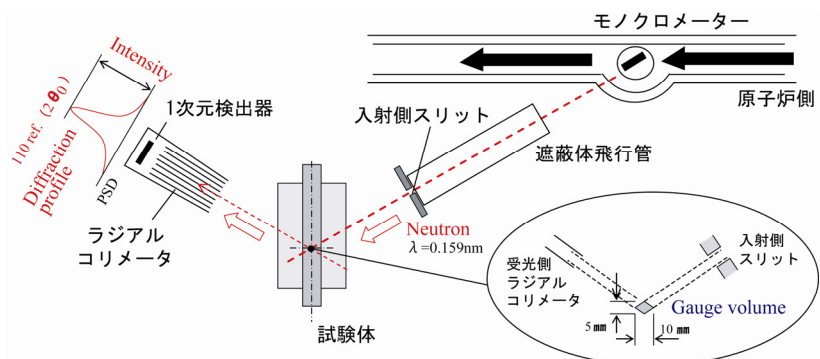


図-1 測定(光学系)概要

*1 東京理科大学 理工学部・建築学科講師 博(工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科・建築学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 東洋建設(株) 技術本部 美浦研究所 主任研究員(正会員)

*4 (独)日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門研究員 博(工)

2.2 測定原理^{1, 2)}

中性子回折法による応力測定の実理を以下に示す。

一般に、結晶粒内には原子が規則正しく整列しており、これら原子は多数の平行な面に属していると考えることができる。これを格子面と呼び、この格子面が多数重なった構造を結晶という。このような結晶構造を有する試料に中性子を照射すると、勿論中性子はあらゆる方向に散乱するが、式(1)に示すブラッグの回折条件式を満足する場合に、これら散乱線が同一位相になって相互に干渉し回折現象を生じる。

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

ここで、 d を格子面間隔、 θ は回折角、 λ を単色化された中性子線の波長とする。また n は回折次数と呼ばれる整数である。ここで、図-2 に示すように材料に応力が作用すると、格子間隔が変化するが、その関係は式(1)を微分することで、式(2)のとおり得られる。

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

すなわち、回折角の変化を測定することで格子ひずみを評価することが可能となるのである。さらに、無応力状態のブラッグ角を θ_0 、格子面間隔を d_0 とすると、ある方向に生じる格子ひずみ ε は式(3)で表すことが可能である。

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

すなわち、回折角の変化量を測定することでひずみを計測することが可能である。

回折角の測定は、図-1 に示したように、スリットを介してビームを照射し、試料中の格子面で回折した中性子を、中性子検出器(一次元検出器)により測定する。このとき、中性子線は入射スリットおよびラジアルコリメータにより行路を制御される。ここで、ラジアルコリメータとは、一次元検出器により観測している領域を制限するためのものであり、入射スリットから平行に伸びた経路とラジアルコリメータにより制限している領域が交差する空間が測定範囲となる。実際に得られる測定結果は、図-2 下図のような回折角度および回折強度(中性子検出カウント数)の関係であり、この数値データをガウス分布に従うものとしてフィッティングし、ピーク角度 $2\theta_0$ を得る。

式(3)で得られた値に弾性係数を乗じると応力が得られる。ただし、ここで用いられる弾性係数(回折弾性定数と呼ばれる)は特定の回折面に対して定まる値であり、鉄筋の引張り試験など機械的な試験で得られる値とは

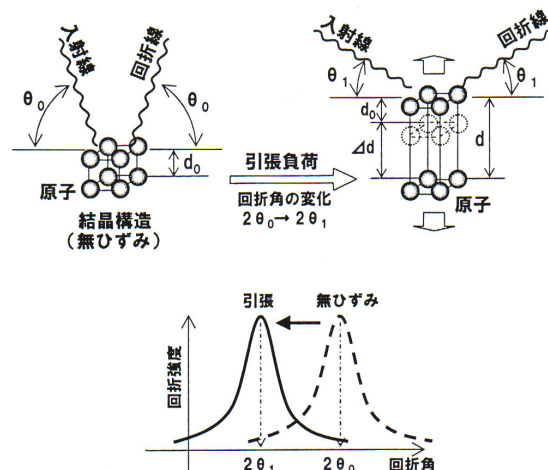
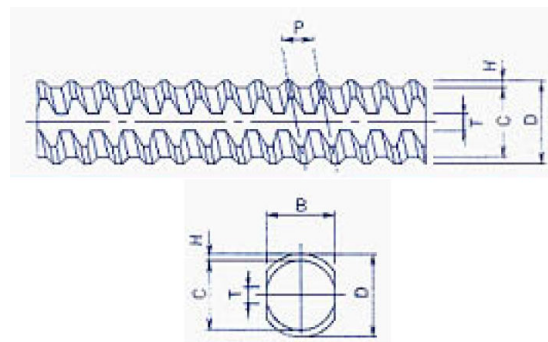


図-2 結晶格子の変化と回折角の変化¹⁾



呼び名	D[mm]	As[mm ²]	fy[N/mm ²]	Es[N/mm ²]
D16	18.0	198.6	523	1.98 × 10 ⁵

P[mm]	B[mm]	C[mm]	H[mm]	T[mm]
8.0	14.7	15.2	1.40	7.8

図-3 鉄筋の形状・寸法および力学的性質

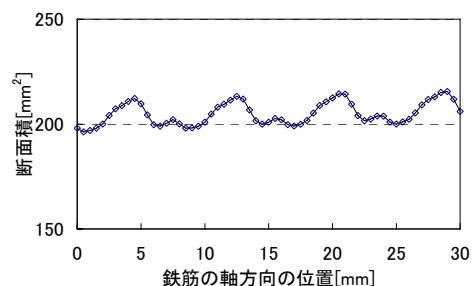


図-4 鉄筋軸方向の断面積のばらつきと分布

異なるため注意が必要である(例えば²⁾)。また、本研究の光学系においてゲージサイズは、図-1 で示したような菱形の空間で、得られる応力はこの区間 ($5 \times 10 \times 3 \text{ mm}$) の平均値である。

3. 実験概要

鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の非破壊測定技術の

表-1 コンクリート調合

水セメント 比 (%)	目標 空気量 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	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)	高性能 AE 減水剤 (%)
55	4	10	49	185	336	845	904	0.7

セメント：普通ポルトランドセメント，細骨材：大井川産陸砂，粗骨材：青梅産硬質砂岩砕石

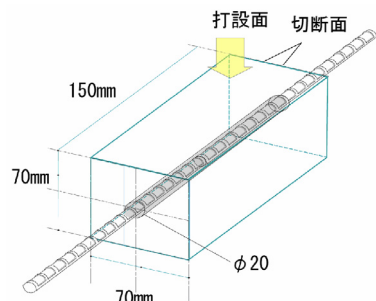


図-5 試験体概要

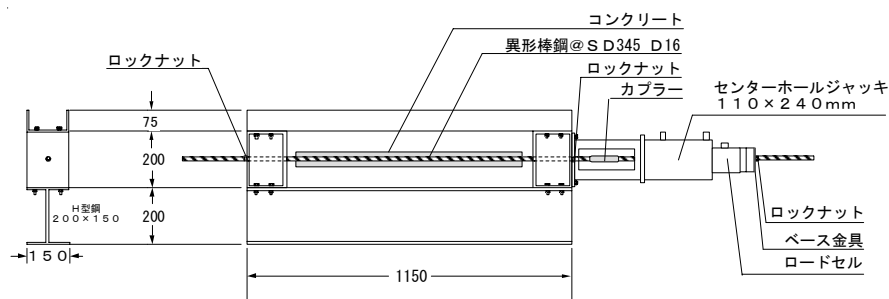


図-6 拘束治具概要

開発を最終目的として、① 鉄筋を用いた基礎的物性試験と、② 鉄筋コンクリート付着試験体を用いたひび割れ近傍の鉄筋応力測定試験の2つの実験を実施した。以下にその概要を示す。

3.1 使用材料・調合・養生条件

鉄筋は、市販の高張力ねじふし棒鋼（SD345 D16，節ピッチ 8mm JIS G3112 準拠）を用いた。図-3 に鉄筋の形状・寸法および実測した力学的性質を示す。また，本研究では，局所応力を測定することを目的としていることから，鉄筋断面の分布の影響がないかを検証する目的で，鉄筋の断面積を金らの手法²⁾を用い3次元形状を測定し，軸方向の断面積分布を確認した。測定結果を図-4 に示す。公称断面に対して平均値で 103.2%，標準偏差が 0.027%という結果となった。

本実験で使用したコンクリートの調合を表-1 に示す。

一般に，中性子は水素元素ほか一部核種によって大きく減衰する特徴を有しており，コンクリートを対象とした場合，コンクリート中の蒸発性水分およびセメント硬化体中の結合水により大きく減衰することが知られている²⁾。そこで，本試験の範囲では中性子の透過性を高めることを目的として，乾燥養生および 105℃乾燥を実施するなど配慮した。

一部湿潤試験体(実験 I で使用)を除いて RESA の測定に用いたコンクリート試験体は全て 24 時間脱型後，72 時間まで封緘養生を施し，さらに，20℃60%環境下で気乾養生した。その後，材齢 28 日より 24 時間 105℃乾燥し，材齢 29 日から 31 日で RESA の測定に供した。

28 日標準水中養生を施した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体の圧縮強度，割裂引張強度（3 本平均値）を表-2 に示す。

3.2 鉄筋を用いた試験 (実験 I)

(1) 試験方法

まず，RESA を用いて一般的な建築用鋼材を測定した

表-2 コンクリートの力学的性質 [N/mm²]

	圧縮		引張	
	気乾	水中	気乾	水中
普通	29.6	47.5	3.1	2.9

場合の挙動を把握することを目的として，D16 ねじふし棒鋼を用い，以降のひずみ測定で用いる基礎パラメータとなる $2\theta_0$ を得るとともに，測定誤差などを検討した。

さらに，RESA によるコンクリートの鉄筋応力測定の可否および可探深度，必要照射時間などの検討を目的とし，試験体中央に円孔を設けたブロック状のコンクリート中に鉄筋を通し，付着応力の発生しない理想的な状態における鉄筋応力の測定可能性について検討した。そして得られた結果より，所用のピークカウント数(100 カウント程度)を得るための照射・測定時間や，コンクリートが鉄筋の応力測定に及ぼす影響などについて検討した。

コンクリート試験体は，図-5 に示すように，中央に $\phi 20\text{mm}$ の孔を設け，異形棒鋼を試験体中央に通して，鉄筋にのみ応力がかかる状態で RESA による応力測定を行った。また，応力の導入は，図-6 に示す拘束治具を用い，センターホールジャッキを用いて載荷した。

(2) 試験結果と考察

D16 鉄筋のみの RESA 測定結果を図-7 に示す。断面積の変動の影響を抑えるため，測定点は，鉄筋のふしの間隔を考慮し 4mm ピッチに 10 点を測定した結果を平均したものである。また，110 回折のひずみ変化に対して鉄の弾性係数の文献値⁵⁾を用いた場合を直線で示した。結果より， $2\theta_0$ はおよそ 46.213° であり，近似の相関係数が 99.3%，標準偏差が 0.0050° と高い精度を有することが確認された。以上の結果より，以降の応力解析ではここで得られた $2\theta_0$ を用いることとする。

図-8 に， $50 \times 50\text{mm}$ および $70 \times 70\text{mm}$ のコンクリー

トブロック中に鉄筋を配置した場合の測定結果を示す。尚、50×50mm 試験体については、24 時間脱形直後より水中養生を施した含水状態の試験体について測定を行った。

その結果、鉄筋のみの結果に比して若干バラツキが大きくなったものの、変わらず高い線形性を有することが明らかとなり、コンクリートに埋設した場合においても同様に RESA による応力測定が可能であることが示された。また、所要のピークカウントを得るための測定時間は、3 分から 5 分/1 点であった。また、ピークカウント数で 100 カウント程度測定できていれば、応力-回折角の関係において試験体寸法（かぶり厚さ）および乾燥状態による系統だった傾向は観察されなかった。

3.3 鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の測定(実験Ⅱ)

実験Ⅰでは RESA によりコンクリートを遮蔽物としても精度よく鉄筋応力を測定できることが示されたことから、実験Ⅱでは実際にコンクリートとの鉄筋の付着がある試験体における鉄筋応力の測定を試みた。また、鉄筋両端に異なる応力レベルの引張応力を生じさせるよう載荷することで、ひび割れを導入し、ひび割れ近傍における鉄筋の局所的な応力分布の測定を試みた。

(1) 試験方法

鉄筋コンクリート中の局所的な鉄筋応力を非破壊測定により明らかにすることを目的として、D16 高張力ねじふし棒鋼を埋設した付着試験用の鉄筋コンクリート試験体を用いた実験を実施した。

試験体寸法および形状を図-9 に示す。試験は、図-6 に示した外部拘束治具に専用ボルトにより拘束し、センターホールジャッキを用いて載荷し、所要の応力レベルで RESA による非破壊応力測定を実施した。各点の測定時間はおよそ 3 分とした。また、図-9 に示す試験体端部においてひずみゲージによるひずみ測定を行った。

応力レベルは、載荷荷重で無載荷、2t、4t を目標として行った。測定箇所は、それぞれ異なるが、試験体中央に生じたひび割れ部分近傍の測定ピッチが細くなるよう、0.5mm から 50mm ピッチとした。

(2) 試験結果と考察

RESA による試験結果を、図-10 に、同様にひび割れ図を図-11 に示す。図-11 は、面 a~d までをひとつにまとめた図である。図中の測定応力は、3.2 の鉄筋のみの測定で得られた $2\theta_0$ を用い、式(3)を用いて求めた値を用いている。また、図中の加圧側鉄筋応力は、応力導入時の目標荷重を公称断面で算した値を示した。また、ひとつの応力レベルの測定におおよそ 3 時間から 5 時間程度かかるため、同時に応力緩和傾向について測定しところ、測定の前後で約 1 割程度の応力緩和が見られた。し

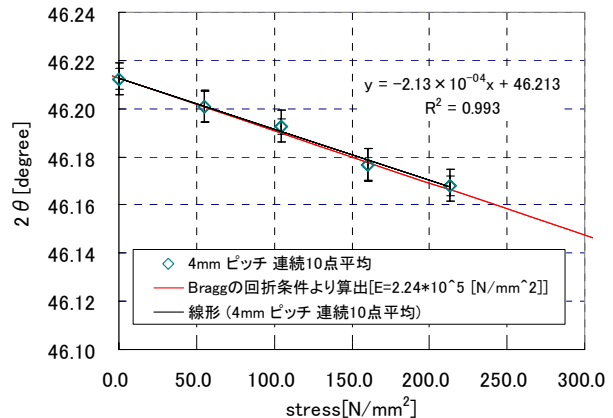


図-7 RESA 測定結果 D16 鉄筋のみ

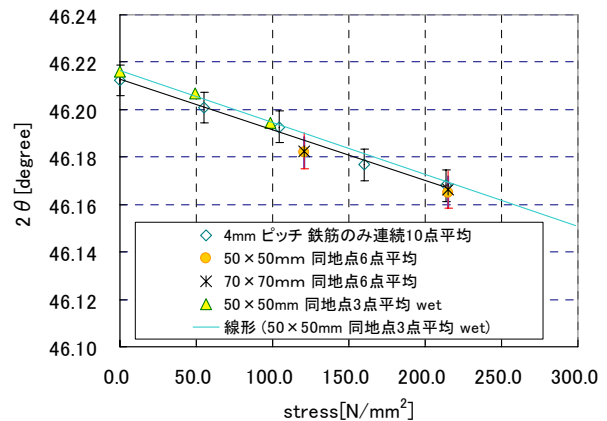


図-8 RESA 測定結果 コンクリート中に配置

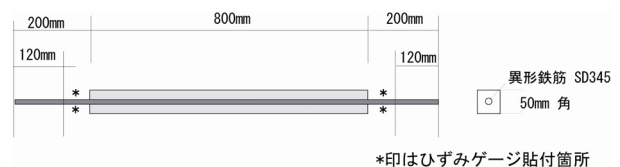


図-9 付着試験用の鉄筋コンクリート試験体概要

かしながら、本研究の範囲では、これらは実測された応力の差に比べると十分に小さい結果であると考えられる。

結果より、無載荷時の結果からは、コンクリートの乾燥収縮に伴い、圧縮側に応力が導入されていることが確認される一方で、測定応力はほぼ全域において載荷応力を最大値として推移している様子が確認された。その他の多くの箇所では鉄筋は載荷応力の 6 割から 8 割程度応力負担している結果となった。測定値が加圧側の鉄筋応力まで到達している箇所は、測定地点近傍にひび割れがはいりその全域にわたって付着が失われている箇所と解釈可能であると考えられるが、外部からのひび割れ観察状況とは必ずしも一致しなかった。ただし、鉄筋応力が高くひび割れが予測される箇所は、載荷応力が増えるに伴

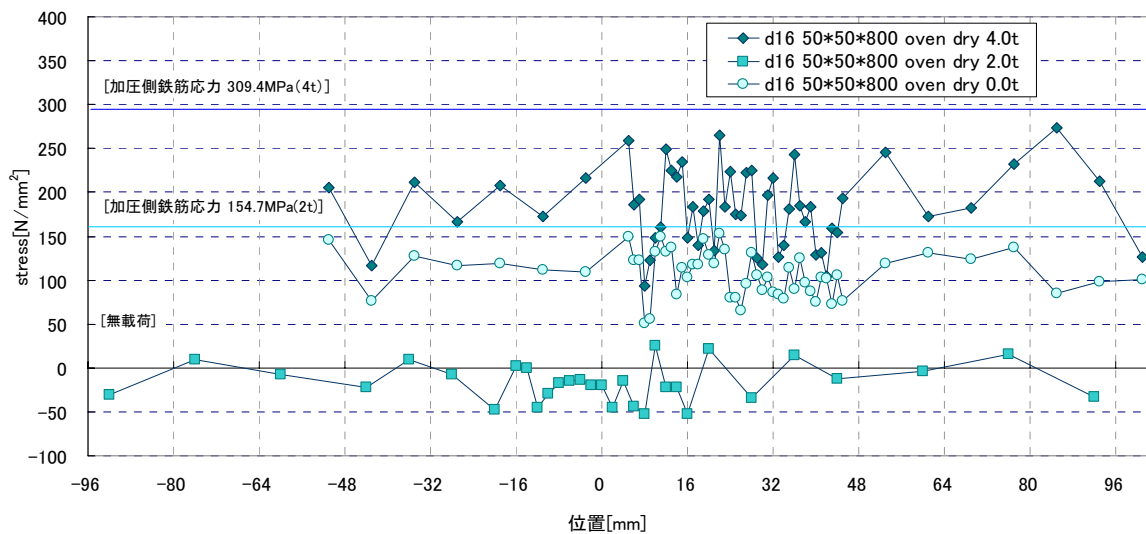


図-10 普通コンクリート測定結果

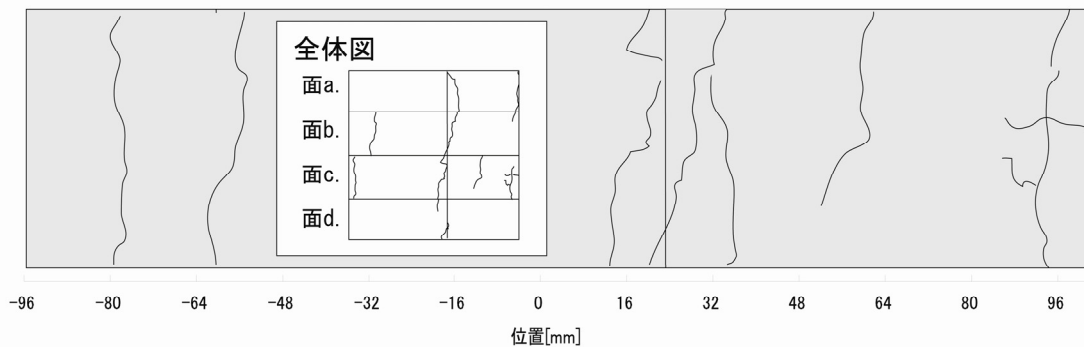


図-11 普通コンクリートのひび割れ図-4t 載荷時- (4面を重ねて表示・中央は全体図)

い、似たような概形で推移している傾向が見られる場合が多かった。

また、鉄筋の形状による影響については、図-4に見られるような断面分布であったが、測定間隔の細かい箇所においても、鉄筋の断面積の分布に起因するばらつきや再帰性は確認できなかった。

一方、無負荷のときの分布と、負荷がかかったときの分布を比較すると、後者の方がばらつきが大きい傾向が観察された。このばらつきの原因としては、鉄筋のリブとコンクリートの機械的相互作用により、リブ部分前後において複雑な応力分布が存在する可能性のあること、また、ひび割れの存在により、リブ近傍での応力分布が存在することなどが挙げられる。この点については、今後、ひずみ感度の良い回折を利用するなど、実験の工夫により精度を上げられる可能性はあると思われる。

以上より、測定されたひび割れ部と思われる箇所の応力の増加傾向や応力レベルは十分に想定される傾向を示していると考えられ、鉄筋のみの試験結果などを踏まえると、ひび割れ部における局所応力を捕らえることに

成功していると考えられる。しかしながら、外部のひび割れ傾向と必ずしも一致するわけではなかったことから、内部の微細ひび割れの状況を確認するなどすることで、測定結果の検証が必要であると考えられる。

ひび割れの近傍の応力状態についての既往研究としては例えば後藤ら⁶⁾の研究が著名であり、鉄筋近傍のひび割れ状況について明らかにされている。その後、例えば島ら⁷⁾、武藤ら⁸⁾の付着に関する研究などでメゾ～ミクロレベルにおける付着応力が解析的に検討されるようになってきているが、しかしながら本研究で測定したような測定ピッチでの応力測定はなされていない。また、乾燥収縮に起因するひび割れ近傍での付着損失については大野ら^{9, 10)}の実験的研究が網羅的であるが、いずれもひび割れ近傍の応力測定はゲージ長の数倍程度(20～30mm)であり、本研究の結果を検証するには不十分である。今後、これら既往の文献を踏まえた検証実験および解析的検討により、より精緻な現象解明を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を用いて鉄筋コンクリート中の鉄筋に生じている応力分布を非破壊的に測定する手法の開発を目的として一連の基礎的研究を実施し、以下を知見として得た。

- (1) 一般的に用いられている異形棒鋼について、応力と回折角の関係を検討し θ_0 を得た。その結果、高い精度で鉄筋応力を測定可能であることが明らかになるとともに、従来の文献値とも整合する結果が得られた
- (2) コンクリート中に配置した鉄筋の測定を行い、鉄筋単体の結果同様、高い精度で鉄筋応力の測定が可能であることが明らかとなった。また、50mm 角試験体、70mm 角試験体の場合、3 分から 5 分で 1 点の測定が可能であることが明らかとなる一方で、所要のピークカウント数が得られていれば鉄筋応力測定には顕著な影響は認められなかった。
- (3) 鉄筋コンクリート中の鉄筋応力を測定した結果、鉄筋中の応力分布を得ることができ、有意な傾向を得ることができたと考える。しかしながら、外部に見られるひび割れなどとの相関は明らかではなく、特に鉄筋近傍の微細ひび割れ状況などの詳細な検討が必要である。

謝辞) 本研究は、名古屋大学 丸山一平准教授、東京大学 長井宏憲助教、東洋建設(株) 荒金直樹氏との共同研究プロジェクトとして、文部科学省 平成 19 年度 中性子利用技術移転推進プログラム(通称トライアルユース)(研究代表 東洋建設(株) 安田正雪)の枠組みで実施したものである。また、試験の実施にあたっては日本原子力研究開発機構 土屋佳則氏、東京大学 辻埜真人氏、東京理科大学 田中大祐氏、石井耕輔氏の多大な協力を得た。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 秋庭義明：新しい光源による応力評価 3. 中性子回折法による応力測定，材料，vol.54，No.7，pp.785-790，2005.7
- 3) 金螢来，北垣亮馬，藤本郷史，長井宏憲，野口貴文：腐食した鉄筋の 3 次元形状分析及び力学的性能の評価(その1.実験計画及び腐食鉄筋の3次元形状分析)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.485-486，2006
- 4) 兼松学，文献調査 中性子ラジオグラフィのコンクリート工学分野への適用に関する研究動向，コンクリート工学，vol.45，No.11，2007. 11
- 5) 鈴木裕士，盛合敦，森井幸生，T.M. Holden，皆川宣明：日本材料学会第 141 回 X 線材料強度に関する討論会講演論文集，pp17-25，2004
- 6) 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わ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
- 7) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第 378 号，V-6，pp.165-174，1987.2
- 8) 武藤信太郎，Worapong Srisoros，中村光，国枝稔：メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.763-768，2005
- 9) 大野義照，徐泰錫，中川隆夫：外部拘束を受ける鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅の予測，日本建築学会構造系論文集，第 616 号，pp.9-16，2007.6
- 10) 大野義照，李振宝，鈴木計夫：持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係，日本建築学会構造系論文集，第 459 号，pp.111-120，1994.5