

鉄筋コンクリート中の応力測定に関する研究

利用者 安田正雪¹，荒金直樹¹，野口貴文²・兼松学³・丸山一平⁴

所属 ¹東洋建設，²東京大学，³東京理科大学，⁴名古屋大学

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(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、本年度は本手法の適用可能性の検討を行うとともに、ひび割れ近傍における鉄筋の応力分布を測定し、ひび割れ近傍の付着破壊領域の応力状態を明らかにすることを目的とする。

2. 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開発を目的として、鉄筋を用いた基礎的物性試験と、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。

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JRR-3のガイドホールに設置されている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(約 0.159nm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。図-1に装置概要を示す。回折角は、スリットにより制御されたビームを照射し、試料中の格子面で散乱した中性子を、中性子検出器(He-3一次元検出器)により測定し、回折角度および回折強度(中性子検出カウント数)の関係より、ガウス分布を仮定してピーク角度を得た。ゲージボリュームは図-1に示すとおりである。

応力の導入は全て図-2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。

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、コンクリートは水セメント55%の普通強度コンクリートとした。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。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度乾燥を実施するなど配慮した。

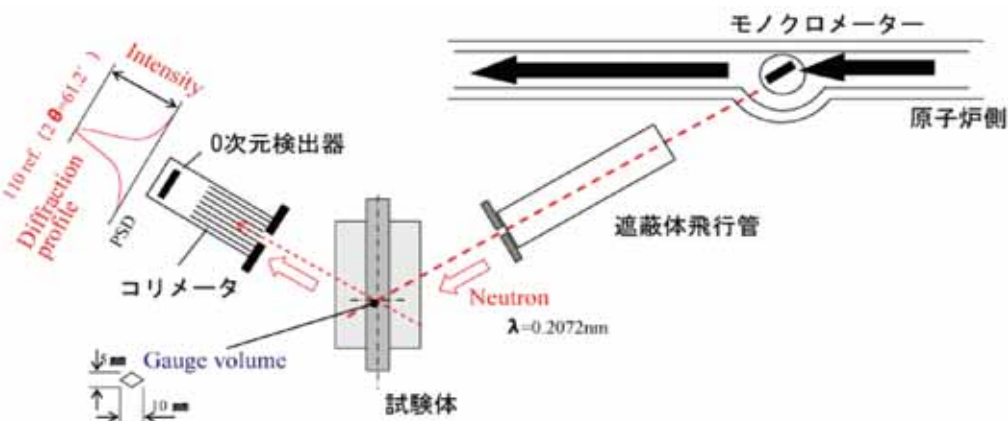


図-1 光学系

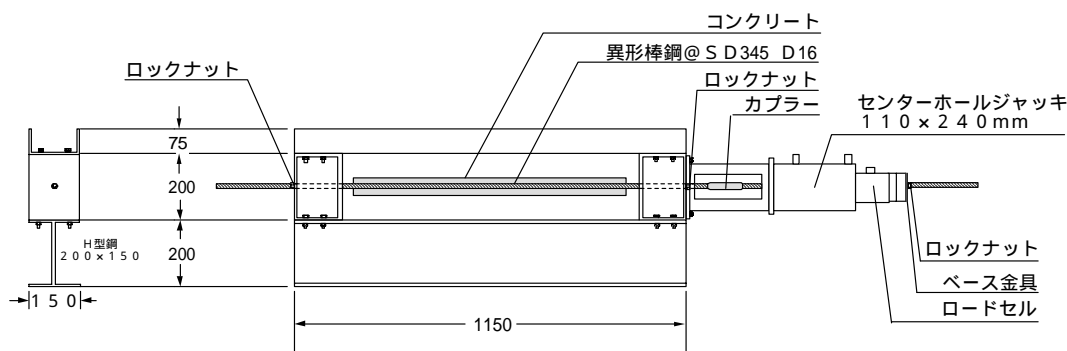


図-2 拘束治具概要

3. 実験結果

3.1 鉄筋を用いた試験 (実験)

(1) 試験概要

まず、RESAを用いて一般的な建築用鋼材を測定した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、中央に 20mm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。

(2) 試験結果

D16鉄筋のみのRESA測定結果を図 - 3 に示す。測定点は、ピッチ間隔を考慮し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ヤング率の文献値を用いた場合を直線で示した。結果より、2はおおよそ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とともに、文献値とも一致していることが確認された。したがって、回折角から求めた値を用いることでほとんど誤差なく測定できることが確認された。

図 - 4に、50×50mmおよび70×70mm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。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。

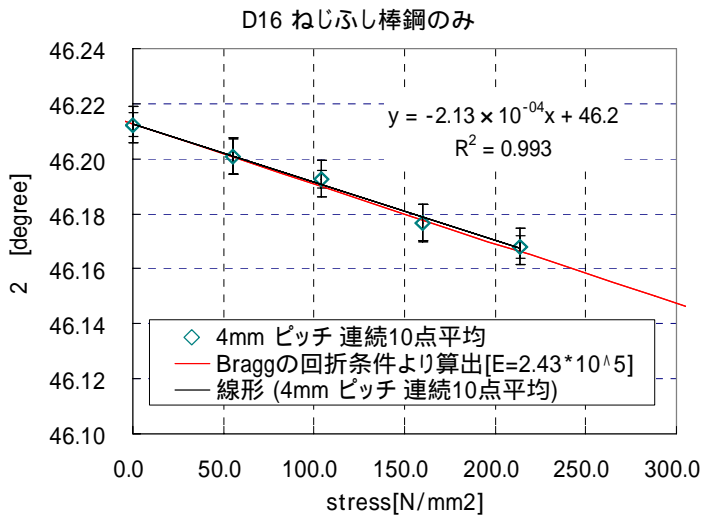


図 - 3 RESA測定結果 D16鉄筋のみ

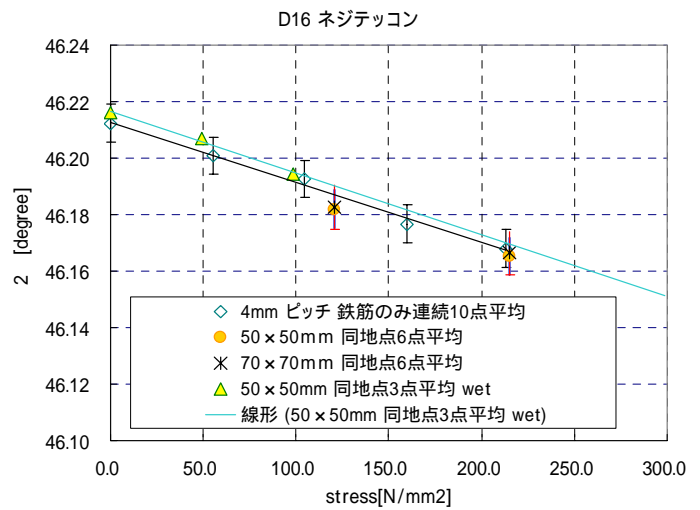


図 - 4 RESA測定結果 コンクリート中に配置



図 - 5 付着用試験体概要

3.2 鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の測定(実験)

(1) 試験概要

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。試験体寸法および形状を図 - 5に示す。試験は、図 - 2に示した外部拘束治具に専用ボルトにより拘束し、無載荷、2t、4tを目標として載荷して応力測定を実施した。各点の測定時間はおよそ3分とし、測定箇所は、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5cmピッチとした。

(2) 実験結果

RESAによる付着試験体結果を、図 - 6に、同様にひび割れ図を図 - 7に示す。図 - 7は、面a~dまでをひとつにまとめた図である。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序した値を示した。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、5mmゲージ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。

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、鉄筋のリップとコンクリートの機械的相互作用により、リップ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、リップ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、測定された試験結果は十分に想定される傾向を示しており、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。

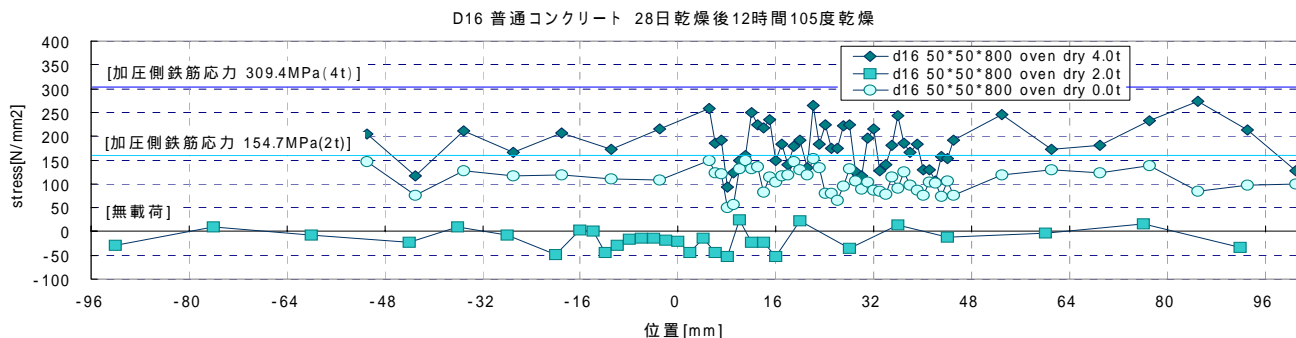


図 - 6 普通コンクリート測定結果



図 - 7 普通コンクリートのひび割れ図 (4面を重ねて表示・中央は全体図)

4. まとめ

本研究では、残留応力解析用中性回折装置(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。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。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タ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。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。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。