

平成30年6月8日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04738

研究課題名(和文) 中性子回折法の鉄筋コンクリート構造力学研究への展開

研究課題名(英文) Development of neutron diffraction method for structural engineering research on reinforced concrete

研究代表者

秋田 貢一 (Akita, Koichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 物質科学研究センター・ディビジョン長

研究者番号：10231820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、角度分散中性子回折法による鉄筋コンクリートの付着応力度測定の精度向上を目的として、多重度因子を考慮した最適測定条件を見出すとともに、日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-3に設置されている中性子応力測定装置 RESA-1において、その条件による高精度測定を実現できる新しい自動集光モノクロメータシステムを開発した。また、中性子回折法による鉄筋コンクリート構造力学研究への展開の取り組みの一つとして、鉄筋コンクリートの曲げ付着挙動解析や、あと施工アンカーの付着応力度評価を行い、鉄筋コンクリート構造力学研究における中性子応力測定技術の有用性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, the measurement condition optimized by considering the multiplicity was found in order to improve the measurement accuracy of the bond stress measurement for the reinforced concrete using an angular dispersive neutron diffraction. New monochromator system for the neutron engineering diffractometer RESA-1 in JRR-3 in Japan Atomic Energy Agency was developed to realize an accurate stress measurement based on the measurement condition optimized in this study. Furthermore, the flexural bond stress evaluation of the reinforced concrete under bending moment and the bond stress evaluation of the post-installed adhesive anchor under pull-out loading were carried out, and it was clarified that the neutron stress measurement can be useful technique in the structural engineering study for the reinforced concrete.

研究分野：材料強度

キーワード：中性子回折 鉄筋コンクリート 付着 応力測定

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート(RC)は、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鉄筋を相補的に組み合わせた複合材料であり、鉄筋とコンクリート間に働く付着力が、コンクリート構造物の一体性や性能を確保する上で重要なパラメータとなる。この付着力は、コンクリートに埋設された鉄筋のひずみ分布を測定することにより評価できる。これまでは、ひずみゲージを用いて測定されてきたが、ひずみゲージ周りの付着劣化によって、正確な付着力の評価が困難とされてきた。この問題を解決するため、近年、中性子回折法によるひずみ測定技術の応用が検討されてきた。

中性子回折法は、中性子線の回折現象を利用して、原子間距離の変化を定量的に評価する物理的な計測法であり、材料深部の応力・ひずみ状態を非破壊・非接触で測定することができる[1,2]。これまでに、大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設 MLF の BL19 に設置されている飛行時間中性子回折装置「匠」[3]や、研究用原子炉 JRR-3 ビームホールに設置されている角度分散型中性子応力測定装置 RESA-1[4]を用いて、普通強度コンクリートに埋設された鉄筋のひずみ分布測定の可能性を検討してきた[5]。その結果、引き抜き負荷中の鉄筋の三次元変形挙動を初めて明らかにするとともに、コンクリートのひび割れ発生や鉄筋腐食に伴う付着劣化の様子を捉えることにも成功した。このように、中性子回折法は RC の付着応力度評価に対して有効なひずみ測定技術であり、将来、ひずみゲージ法に代わる応力測定技術として、RC の構造力学研究に広く応用されると期待されている。

中性子回折法による RC の付着応力度測定においては、飛行時間法に比べると角度分散法の測定精度が低いといった、解決すべき問題が残されている。飛行時間法は、パルス中性子源から得られる白色中性子線を試料に照射した際に、ある角度に回折する中性子線のエネルギー分布を測定する方法である。そのため、角度分散法とは異なり、多くの結晶粒からの情報を一度に測定可能なことから、統計的に測定精度の向上が期待できる。実際に、角度分散法と飛行時間法を用いて測定した鉄筋のひずみ分布測定を比較した結果、飛行時間法による測定精度の方が高いことを確認している。つまり、中性子回折から得られる情報量が増えれば、測定精度が向上することを意味しており、そのことから、角度分散法の測定精度向上には、多重度因子(同じ面間隔・構造因子であるが方位の異なる面の数を表すパラメータであり、その数字が大きいほど回折に寄与する結晶粒が多くなることを意味する)の大きな回折面に対するひずみ測定がカギになる。例えば、立方晶においては、多重度因子が24以上となる211、310、321回折などを選択すれば、より精度の高いひずみ分布測定が可能になると考えられる。

これを実現するためには、これらの回折が適切な回折角で測定可能な中性子回折光学系を設計・整備するなど、コンクリートに埋設された鉄筋の高精度ひずみ測定を実現するための基盤要素技術の開発が必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、角度分散型中性子回折法に着目し、多重度因子を考慮した最適測定条件を見出すことで、RCの付着応力度測定の測定精度の向上を図り、これにより、飛行時間法と同等の測定精度で鉄筋コンクリートの付着応力度測定を可能にする。本研究目標を達成することで、飛行時間法と角度分散法を相補的に利用できる実験環境を整備し、将来の「中性子を利用した鉄筋コンクリートの構造力学研究拠点」の確立と建築・土木分野への産業利用の展開を目指す。

3. 研究の方法

中性子回折法による付着応力度測定に着目し、多重度因子を考慮した最適測定条件を見出すとともに、RESA-1においてそれを可能にする、自動集光モノクロメータシステム(炉心より発生する波長範囲の大きい中性子線より、ある特定の波長の中性子線のみを選択するための単色化装置)の開発を行った。また、中性子回折法によるRCの構造力学研究への展開の取り組みの一つとして、RCの曲げ付着挙動解析や、あと施工アンカーの付着応力度評価を行い、中性子回折法がこれらの付着応力度評価に有効な測定手段であることを明らかにした。

4. 研究成果

(1) 多重度因子の影響

J-PARCのMLFにある飛行時間型中性子回折装置(匠)により測定した鉄筋のひずみ分布測定結果について、回折面ごとにひずみ分布を整理した結果、図1に示すように、211回折よりも高次の回折面(多重度因子が24以上)を用いることで、測定精度が向上することを明らかにした。

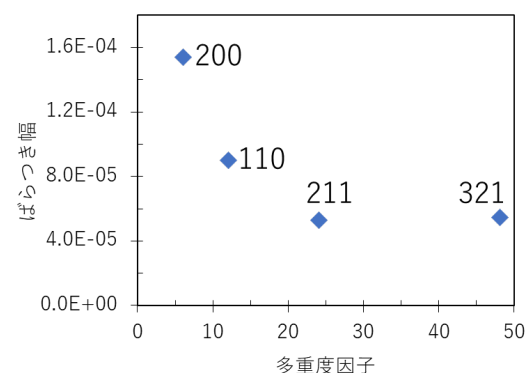


図1 多重度因子とばらつきの関係

(2) モノクロメータシステムの開発

前項に示した知見に基づき、中性子応力測

定装置 RESA-1 において、211 回折よりも高次の回折面のひずみ測定を、90 度以下の回折角度で実現できる自動集光モノクロメータシステム（単色化機構）の開発を行った。理論計算やモンテカルロシミュレーションの結果、Si(400)の利用、Si110 晶帯を利用した波長範囲の拡大、0.7mm 厚さのシリコンウエハを 15 枚積層させた積層型結晶の利用、縦に 7 段の結晶の配置、縦横の集光自動制御の実現により、上記性能を満足できるとともに、現行のモノクロメータシステムに対して 2 倍から 2.5 倍の中性子強度が期待できることが分かった。これらの条件を満足させる集光機構の設計を行い、図 2 に示す自動集光モノクロメータシステムを製作した。本システムでは、4 点曲げの原理により結晶に曲げモーメントを加えることで、水平方向に集光させることができる。また、縦に並んだ結晶のあおり角を調整することにより、垂直方向に各結晶からの回折線を集光させることができる。これらの集光は、カム機構により実現しており、水平方向と垂直方向の同時集光が可能である。

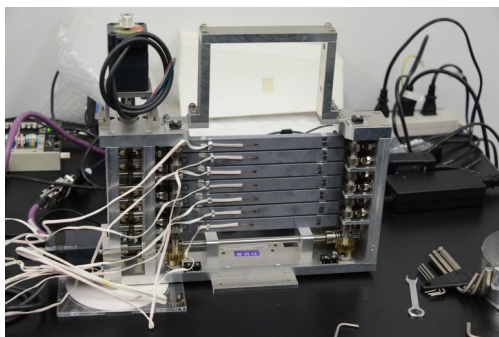


図 2 開発した自動集光モノクロメータシステム

(3) モノクロメータシステムの検証

理化学研究所の小型中性子源システム RANS [6] を用いて、図 2 に示した自動集光モノクロメータシステムの実験的検証を行った。まず初めに、シリコンウエハ積層型結晶と従来のバルク結晶の Si400 回折の回折強度を比較した結果、シリコンウエハ積層型結晶の回折強度は、バルク結晶に同等あるいはそれ以上の中性子ビーム強度が得られる可能性があること、積層するシリコンウエハの枚数を増加させることにより、比例的に中性子ビーム強度が増加することを明らかにした。次に、開発した図 2 に示す集光機構により、垂直および水平方向の集光性能を評価した。その結果、図 3(a)に示すように、結晶の曲げによる曲率半径の減少に伴い、水平方向に集光して回折強度が増加する傾向を確認した。また、図 3(b)に示すように、垂直方向に並ぶ 7 段の結晶の角度を調整することにより、垂直方向の曲率半径が減少し、それに伴い垂直方向に集光して回折強度が増加する傾向を確認した。

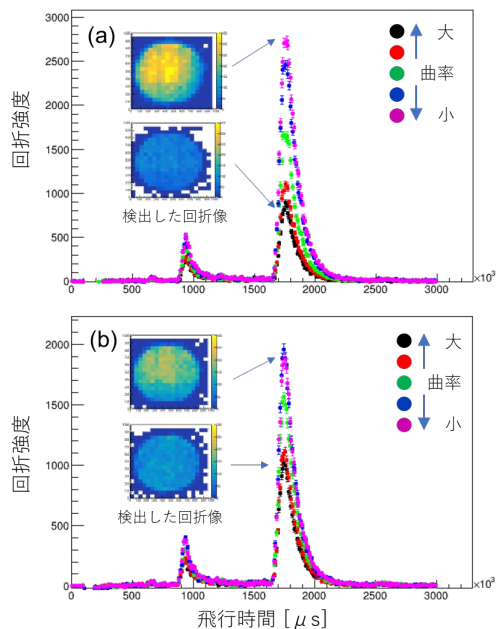


図 3 (a)水平および(b)垂直方向の集光性能

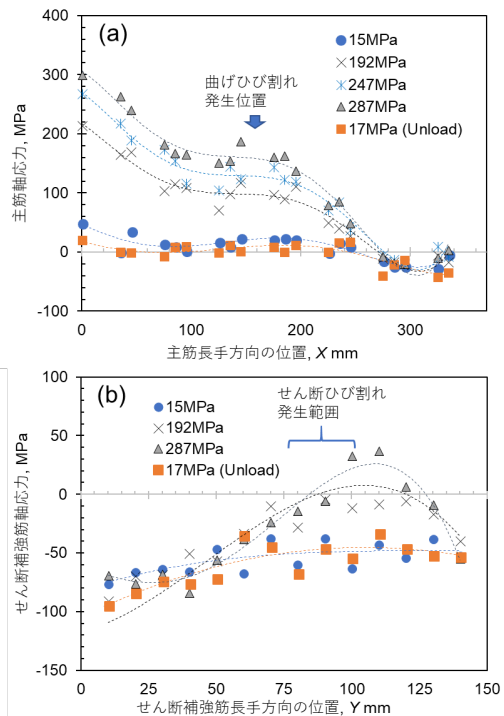


図 4 曲げを受けた鉄筋コンクリート試験体における(a)主筋、および(b)せん断補強筋の軸応力分布

以上より、本研究において開発したモノクロメータシステムを RESA-1 に導入すれば、211 回折よりも高次の回折面のひずみ測定を、90 度以下の回折角度で実現することができ、これにより、鉄筋コンクリートの高精度付着応力度測定が可能になると考えられる。

(4) 応用研究

中性子回折法による鉄筋コンクリート構造力学研究への展開の取り組みの一つとし

て、鉄筋コンクリートの曲げ付着挙動解析や、あと施工アンカーの付着応力度評価を行った。ここでは、曲げ付着挙動解析について得られた成果を説明する。なお、本研究期間中に JRR-3 が再稼働しなかったために、開発したモノクロメータシステムを用いた応力測定の見証はできなかった。したがって、ここでは、将来の RESA-1 による見証を見据え、その参照データの取得を主目的として、J-PARC MLF の TAKUMI を用いた検討を行った。

曲げモーメントおよびせん断力が作用する梁構造では、曲げモーメントにより発生する曲げ付着力は、せん断力に応じて分布していることが知られている。しかし、主筋やせん断補強筋にかかる応力分布を正確かつ詳細に測定する方法がなかったために、ひび割れ発生に伴う局所的な付着劣化が曲げ付着性能に及ぼす影響は明らかにされてこなかった。そこで本研究では、RC 部材の曲げ付着機構の解明に向け、中性子回折法を用いた、主筋、およびせん断補強筋の応力分布の測定を試みた。

本実験では、2 本の主筋 (D10 異形鉄筋) と 6 本のせん断補強筋 (D6 異形鉄筋) を配した梁型試験体を用いた。この梁型試験体に曲げモーメントを発生させ、主筋およびせん断補強筋の応力分布を測定した。図 4(a) に載荷応力と軸方向応力分布の関係を示す。コンクリートの乾燥収縮に伴う圧縮応力、また載荷応力の増加やひび割れ発生に伴う応力分布の変化が確認できる。一方、せん断補強筋においては、図 4(b) に示すように、せん断ひび割れの位置に向かって引張応力が増加する応力分布を示した。この結果は、ひび割れ近傍ではコンクリートの応力負担が小さくなるが、ひび割れから離れると主にコンクリートが応力を負担することを示唆している。このように、中性子応力測定技術を用いれば、より実構造に近い梁型試験体においても、主筋およびせん断補強筋の応力分布の測定が可能であることを示した。

(5) 結論

本研究では、角度分散中性子回折法による鉄筋コンクリートの付着応力度測定の精度向上を目的として、多重度因子を考慮した最適測定条件を見出すとともに、JRR-3 の RESA-1 においてそれが実現できる新しい自動集光モノクロメータシステムを開発した。また、中性子回折法による鉄筋コンクリート構造力学研究への展開の取り組みの一つとして、鉄筋コンクリートの曲げ付着挙動解析や、あと施工アンカーの付着応力度評価を行い、鉄筋コンクリート構造力学研究における中性子応力測定技術の有用性を明らかにした。

謝辞：中性子回折実験は J-PARC において実施した (J-PARC 課題番号：2015A0163、

2016A0066、2017B0246)。関係各位に謝意を表す。

< 引用文献 >

- [1] A.J. Allen, M.T. Hutchings and C.G. Windsor, *Adv. in Physics*, 34(4), 445-473 (1985)
- [2] ISO/TS 21432:2005(E), Non-destructive testing, Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction, 2005
- [3] S. Harjo, T. Ito, K. Aizawa, H. Arima, J. Abe, A. Moriai, T. Iwahashi and T. Kamiyama: *Current Status of Engineering Materials Diffractometer at J-PARC*, Materials Science Forum, 681, 443-48, (2011)
- [4] 鈴木 裕土, 勝山 仁哉, 飛田 徹, 森井 幸生, *溶接学会論文集*, 29, 294-304 (2011)
- [5] 例えば, H. Suzuki, K. Kusunoki, Y. Hatanaka, T. Mukai, A. Tasai, M. Kanematsu, K. Kabayama and S. Harjo, *Measurement Science and Technology*, 25, 025602, (2014)
- [6] Yoshimasa Ikeda, Atsushi Taketani, Masato Takamura, Hideyuki Sunaga, Masayoshi Kumagai, Yojiro Oba, Yoshie Otake, Hiroshi Suzuki, *Nucl. Instr. Meth. A*, 833, 61-67 (2016)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

鈴木裕土、樋浩一、佐竹高祐、兼松学、小山拓、丹羽章暢、椋山健二、向井智久、川崎卓郎、ハルヨステファヌス、中性子回折法による曲げとせん断を受けた鉄筋コンクリートの付着応力度の非破壊評価、非破壊検査、査読有、Vol.67、No.4、2018、pp.180-186
<https://doi.org/10.11396/jjsndi.67.180>
鈴木裕土、樋浩一、兼松学、向井智久、中性子回折法による鉄筋コンクリートの付着応力度分布の非破壊測定、査読有、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.17、2017、pp.179-184

[学会発表](計 6 件)

H. Suzuki, S. Morooka, P.G. Xu, K. Akita, *Current State of Japanese Engineering Diffractometer, RESA-1, 6th Design and Engineering of Neutron Instruments Meeting*, 2017.11.29-12. 1, University of Technology, Sydney (Australia)
Hiroshi Suzuki, Koichi Kusunoki, Manabu Kanematsu, Tomohisa Mukai, *Recent Progress on Structural Engineering Studies of Reinforced Concrete using Neutron Diffraction*, 9th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation, 2017.9.19-21,

SKUKUZA REST CAMP, (South Africa)
佐竹高祐、楠浩一、向井智久、兼松学、
小山拓、鈴木裕士、飛行時間中性子回折
法を用いた RC 部材の曲げ付着応力度の
評価、2017 年度日本建築学会大会、
2017.8.31-9.3、広島工業大学(広島)
鈴木裕士、諸岡聡、秋田貢一、ハルヨス
テファヌス、川崎卓郎、相澤一也、中性
子応力測定信頼性に及ぼす系統誤差
の影響、第 51 回 X 線材料強度に関する
シンポジウム、2017.7.27-28、兵庫県私学
会館(神戸)
鈴木裕士、秋田貢一、諸岡聡、中性子応
力測定装置 RESA-1 の現状と高度化、日
本中性子科学会第 16 回年会、2016.12.1-2、
名古屋大学(名古屋)
土屋直子、向井智久、楠浩一、兼松学、
椋山健二、鈴木裕士、中性子回折法を用
いたあと施工アンカーの付着応力分布
に関する基礎的研究、2016 年度日本建築
学会大会、2016.8.24-26、福岡大学(福岡)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋田 貢一 (AKITA, Koichi)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・原子力科学研究部門 物質科学研究セ
ンター・ディビジョン長
研究者番号：10231820

(2) 研究分担者

鈴木 裕士 (SUZUKI, Hiroshi)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機
構・原子力科学研究部門 物質科学研究セ
ンター・リーダー
研究者番号：10373242

楠 浩一 (KUSUNOKI, Koichi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：00292748