

[2024105207]

中性子応力測定技術によるコンクリート用補強材の形状最適化

Shape Optimization of Rebars for Concrete Based on Neutron Stress Measurement Technique

周佳遠^{A)}, 川上真由^{A)}, 小林謙祐^{A)}, KIM JUNHO^{A)}, 宮津裕次^{A)}, 向井智久^{B)}, 西尾悠平^{C)}, 兼松学^{#A)}
Jiayuan ZHOU^{A)}, Mayu KAWAKAMI^{A)}, Kensuke KOBAYASHI^{A)}, Junho KIM^{A)}, Yuji MIYAZU^{A)},
Tomohisa MUKAI^{B)}, Yuhei NISHIO, Manabu KANEMATSU^{#A)}

^{A)} Tokyo University of Science,

^{B)} National Institute for Land and Infrastructure Management,

^{C)} Building Research Institute

Abstract

In order to clarify the influence of the bond characteristics of free-form reinforcement on the adhesive performance with concrete, neutron diffraction bonding tests were carried out on six types of metal steel bars with different node angles and node spacing. The results showed that the node spacing has a greater effect on the stress distribution of the reinforcement due to the change rate of anchorage length caused by the node angle and node spacing. In addition, the stress reduction gradient tends to become gentler with an increase in node spacing.

Keyword: node angles, node spacing

1. はじめに

近年、複合構造物である鉄筋コンクリート(RC)構造物の高層化、軽量化に伴い鉄筋を利用するための技術開発が進んでいるため、鉄筋の付着性状の把握が重要となる。特に、異形鉄筋においては、節高さ、節角度および節間隔により付着性状が異なることが明らかにされている^{1),2),3)}。しかしながら、補強材の形状に対する検討は表面形状に留まる。

一方で、3D プリンティング技術が普及していることから、将来的に補強材の表面形状だけでなく、補強材そのものの形状がより複雑になることが予測される⁴⁾。したがって、形状がより複雑になる補強材の付着性状を実験で検討することにより、従来の補強材とは全く異なる革新的な形状の補強材の作製が可能となる。

Table 1 Experimental Level

Parameters	Shapes
Rib angle (°)	45°, 90°
Mean rib spacing (mm)	3.0mm, 6.0mm, 12.0mm

Table 2 Concrete Materials

Materials	Types and properties
Water (W)	Deionized water
Cement (C)	Ordinary portland cement Density : 3.16 g/cm ³
Fine aggregate (S)	Land sand from Oi river Absolute dry density : 2.58 g/cm ³
Coarse aggregate (G)	Crushed stone from Ome Maximum particle size : 10 mm Absolute dry density : 2.66 g/cm ³
Chemical admixture (Ad)	Standard type

Table 3 Concrete Mix Proportions and Properties

W/C (%)	G _{max} (cm)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)				Ad (g)	Air (%)	SL (cm)	σ _c (Test day) (MPa)	σ _t (Test day) (MPa)	E (Test day) (GPa)	σ _c (28 day) (MPa)	E (28 day) (GPa)
			W	C	S	G								
60	10	46	175	294	808	993	5292	5.6	18.0	28.88	2.04	21.4	31.04	26.7

本研究では、自由な形状の補強材の付着特性を明

らかにすることを目的とし、実験的検討として引抜試験および中性子回折技術を用いた付着試験を実施した。

2. 自由な形状の補強材の付着特性

2.1 実験水準および試験対概要

本実験では、従来の補強材と形状が異なる補強材の付着性状を検討する。実験水準を Table 1 に示す。節角度 45°, 90°および節間隔 3.0mm, 6.0mm, 12.0mm の計 6 水準について検討した。

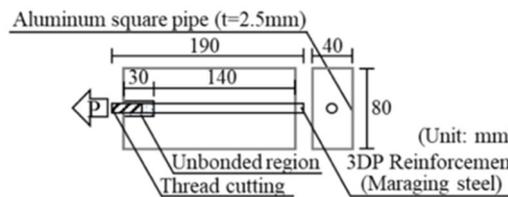


Fig.1 Schematic Diagram of The Specimen

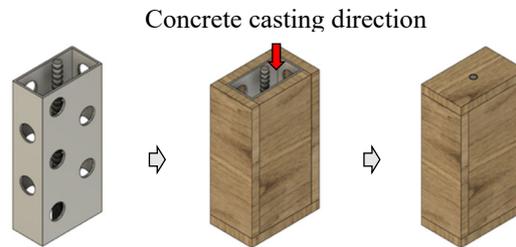


Fig.2 Image of formwork and pouring procedure

[2024105207]

2.2 中性子回折法の概要

本実験に用いた試験体の概要を Fig.1 に示す。試験体は、Fig.1 に示すコンクリート母材に補強材を配置することで作製した。補強材とコンクリートとの付着区間は 140mm とした。また、非付着区間(30mm)は、打設時に設置したゴムホースを硬化後に抜き取ることにより作製した。試験体の作製方法を Fig.2 に示す。一定間隔に穴(φ21mm)を開けたアルミ角パイプに、コンクリートを充填することにより試験体を作製した。また、型枠をアルミ角パイプの外側に設置する。

試験体は、コンクリートの打設後 24 時間で脱型し、材齢 14 日まで 20°C の水中養生を行った。その後、20°C・RH60% の環境で 24 時間の気中乾燥を行い、大型乾燥機により材齢 27 日まで 60°C の機械乾燥を実施した。さらに、材齢 41 日まで再度気中乾燥を行い、その後大型乾燥機により材齢 55 日まで 60°C の機械乾燥を実施した。乾燥後の試験体は、コンクリート面にアルミテープを貼付した。中性子回折法による補強材の応力測定は、材齢 55 日から 5 日間で実施した。中性子回折法に供する試験体数は、1 水準につき 1 体とした。コンクリートの使用材料および調合を、Table 2 および Table 3 に示す。ここで、試験日(材齢 22 日)の強度値は前述した養生条件における値である。

2.3 中性子回折法の概要

本実験の鉄筋応力測定には、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 実験利用棟ビームホールに設置されている中性子応力測定装置(diffractometer for REsidual Stress Analysis: RESA)を用いた。RESA は角度分散法(angle dispersive method)を用いた測定装置である。中性子は個々の原子に当たると散乱し、式(1)のブラッグの回折条件式を満たす場合に、散乱した中性子が干渉し合い、回折現象が起こる。

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

ここで、 d : 格子面間隔
 θ : 回折角
 n : 回折次数
 λ : 入射中性子の波長

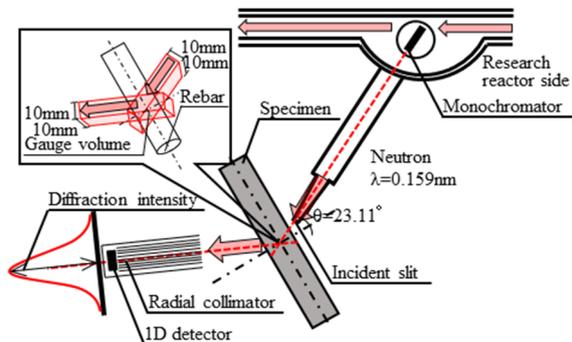


Fig.3 Strain Measurement Outline

材料に負荷を加えると、結晶格子の格子面間隔は変化する。格子面間隔の変化は、式(1)を微分するこ

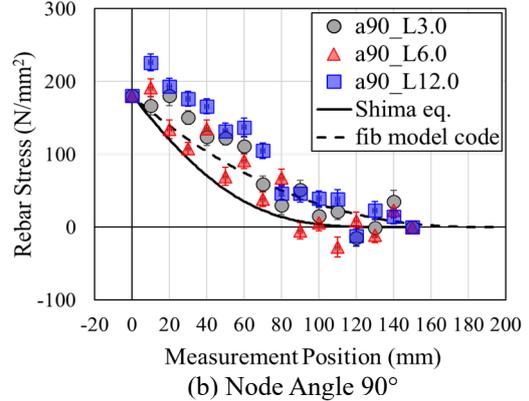
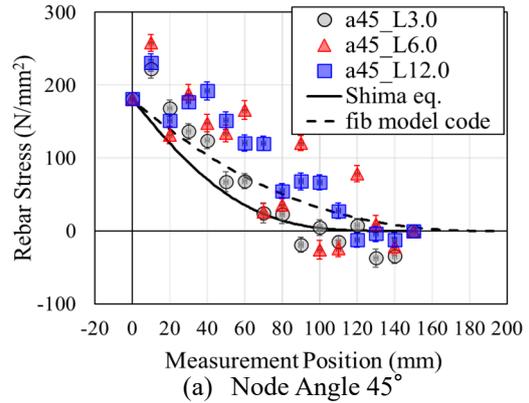


Fig.4 Stress Distribution in PC Steel Bars

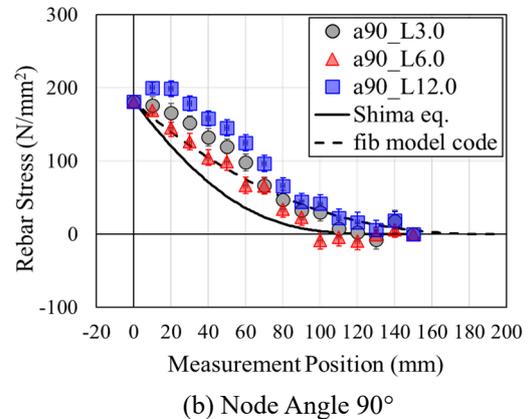
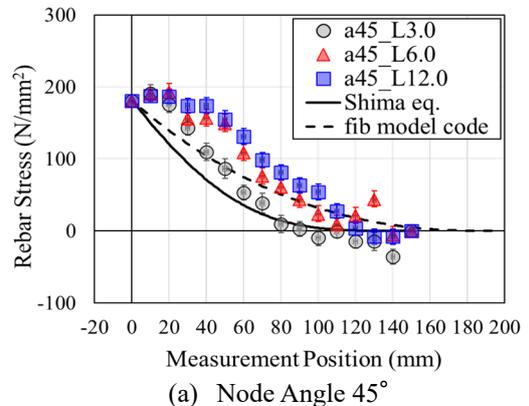


Fig.5 Stress Distribution of PC Steel bar
Calculated by 3-point Moving Average

[2024105207]

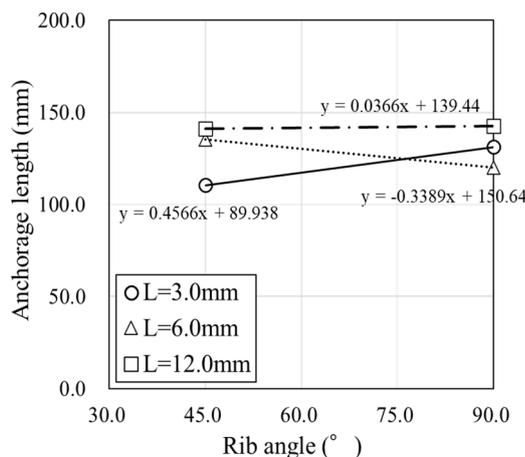
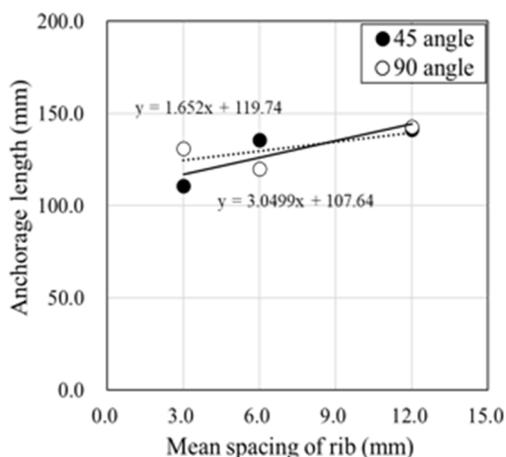
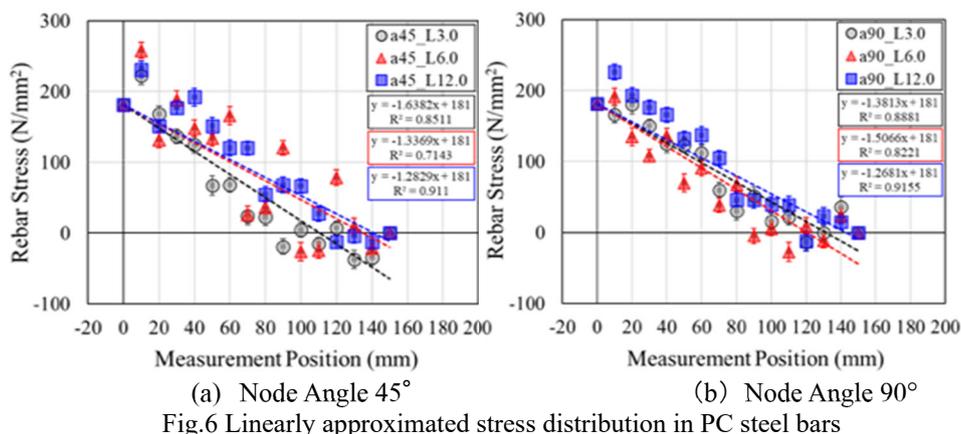


Fig.7 Relationship between node spacing and root length
とによって、回折角の変化に置き換えることが可能であり、その関係は式(2)によって表される。

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

ここで、 ε : 弾性ひずみ
 d_0 : 初期状態の格子面間隔
 θ_0 : 初期状態の回折角

以上より、載荷前後における回折角の変化 $\Delta\theta$ を測定することにより、弾性ひずみの算出が可能となる。本実験では、式(2)によって算出された鉄筋軸方向の弾性ひずみに、回折弾性係数(20.0GPa)を乗じることで鉄筋応力を算出した。なお本実験では、初期に導入されていた乾燥収縮等の影響を除去するため、低応力(8MPa \approx 1kN)を負荷した状態の格子面間隔を初期状態の格子面間隔とした。

RESA の概要を Fig.3 に示す。研究用原子炉から単一波長の熱中性子を取り出し、入射スリットによって整形された中性子が試料に照射される。試料によって回折された中性子は、1 次元検出器によって検出される。検出器では到達した中性子の回折角ごとの個数を一定時間計測しており、回折角度と強度との関係を取得する。本実験においては、回折角度と強度との関係がガウス分布に従うものとして、グラフ作成ソフトによるフィッティング解析によりピーク回折角 2θ を算出した。式(1)より回折角から

Table 4 Anchorage length and average bond stress at each level

Parameter	Anchorage length (mm)	τ (N/mm ²)
a45_L3.0	110.5	4.00
a45_L6.0	135.4	3.26
a45_L12.0	141.1	3.13
a90_L3.0	131.0	3.37
a90_L6.0	120.1	3.68
a90_L12.0	142.7	3.10

格子面間隔 d を求め、式(2)より弾性ひずみ ε を算出した。

実際に RESA で測定される範囲は Fig.3 に示す四角柱部分(gage volume)であり、入射スリットのサイズおよびラジアルコリメータの幅により決定される。また、格子ひずみはこの体積の平均値として算出される。なお、本研究で測定する回折面は(110)面、中性子の波長は 1.59 Å、入射スリットのサイズは 10×10mm、ラジアルコリメータの幅は 5mm とした。

2.4 実験結果および考察

Fig.4 には、RESA により測定されたひずみ分布により算出した PC 鋼棒の応力分布(縦軸は鉄筋応力、

[2024105207]

横軸は付着区間の始まり(X=0mm)からの距離)を示す。また、Fig.5には、Fig.4の結果を3点移動平均することにより算出したPC鋼棒の応力分布を示す。

はじめに、節角度がPC鋼棒の応力分布に及ぼす影響に着目をする。Fig.5より、節角度45°および節角度90°における応力分布の減少勾配は概ね同様の傾向となる。したがって、節角度が補強材の応力分布に及ぼす影響は小さいと推察される。また、節間隔3.0mmの場合、応力減少勾配は節角度45°の方が大きく、節間隔6.0mmの場合においては節角度90°の方が大きく、節間隔12.0mmの場合においてはどちらも同様の傾向となる。このように、節角度が補強材応力分布に及ぼす影響は節間隔により異なることが示唆された。

次に、節間隔がPC鋼棒の応力分布に及ぼす影響に着目すると、Fig.5により、節間隔の増大に伴い応力減少勾配が緩やかになる傾向にある。

上記の考察を詳細に検討するため、小林らの研究⁵⁾を参考に、近似線を用いて、節形状が鉄筋応力分布に及ぼす影響をより詳細に検討した。Fig.6はFig.4の結果を線形近似した鉄筋応力分布である。Fig.6には、各近似線の近似式およびR²乗の値を併せて示す。また、線形近似した鉄筋応力分布より算出した定着長および平均付着応力をTable 4に示す。さらに、節間隔と定着長の関係をFig.7に、節角度と定着長の関係をFig.8に示す。定着長は、Fig.6に示す近似線における、X=0mmから応力が0になる位置(X切片)までの距離とした。また、平均付着応力は式(3)により算出した。

$$\tau = \frac{I_S S_R}{P L_A} \quad (3)$$

ここで、 I_S : 補強材への導入応力(MPa)、 S_R : 補強材の断面積(mm²)、 P : 補強材の周長(mm)、 L_A : 定着長(mm)。

Fig.6およびFig.7より、節間隔の増大に伴い近似線の傾き、すなわち平均付着応力が低下し、定着長が大きくなることが分かる。さらに、Fig.8に着目すると、節角度と定着長の関係は一義的ではないものの、節角度が付着性能に及ぼすことが小さいことが分かる。ここで、節角度による定着長の変化率は、節間隔3.0mmにおいて約0.46、節間隔6.0mmにおいて約0.34、節間隔12.0mmにおいて約0.04であり、節間隔による定着長の変化率(Fig.7)と比較小さい値となった。これは、節周辺のコンクリートの破壊形態が節角度により異なることに起因すると推察される。節角度が45°未満の場合、節がコンクリートを押し広げる作用により割裂破壊が生じ⁶⁾。一方、節角度が45°以上の場合、節側面のコンクリートが局部的に圧壊し、最終的には割裂破壊となる⁷⁾。本実験においては節角度45°および90°を水準としていることから、コンクリートの破壊形態は概ね同様となることが予想される。したがって、節角度が付着性能に及ぼす影響は小さくなったと推察される。

3. まとめ

本研究において中性子回折応力試験装置を用い得られた知見を以下に示す。

- 1) 節間隔の増大に伴い付着性能が低下することを確認した。また、節間隔の増大に伴い応力減少勾配が緩やかになる傾向にある。
- 2) 節角度と節間隔による定着長の変化率により、節間隔のほうが補強材の応力分布に及ぼす影響は大きい。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP20H02302、第66回竹中育英会建築研究助成の助成を受けたものである。また、本研究の中性子回折実験は、2022年度および2024年度日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構 施設利用共同研究(課題番号: 22045, 2024105207)として実施した。さらに、本研究の実施にあたり、日本原子力研究開発機構 徐平光氏、柴山由樹氏ほか、多くの皆様のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 国分正胤, 岡村甫: 太径鉄筋の使用に関する研究, 土木学会論文報告集, No.202, pp.103-113, 1972
- [2] A. P. Clark: Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete reinforcing Bars, ACI Journal Proceedings, Vol.43, No.11, pp.381-400, 1946
- [3] 赤司二郎, 藤井 栄, 森田司郎: コンクリート強度と鉄筋のふし形状が付着特性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.127-132, 1991.7
- [4] V. Mechtcherine, et al.: 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction - Manufacture, mechanical properties and bond behaviour, Construction Building Materials, Vol.179, pp.125-137, 2018
- [5] 小林謙祐, 鈴木裕士, 西尾悠平, 兼松 学: 中性子回折法による溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリートの付着性能評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.785, pp.1026-1035, 2021.7
- [6] Hamed M. Salem et al.: Pre- and Postyield Finite Method Simulation of Bond of Ribbed Reinforcing Bars, Journal of Structural Engineering, Vol.130, No.4, pp.671-680, 2004
- [7] P. Desayi, S. Krishnan: Equation for the Stress Strain Curve of Concrete, Journal of American Concrete Institute, Vol.61, pp.345-350, 1964