

[21036]

応力測定技術に基づくコンクリート用補強材の形態最適化 Morphological optimization of concrete reinforcements by using the stress measurement technology

安江歩夢^{A)}, 小林謙祐^{A)}, 山元玲央真^{A)}, KIM JUNHO^{A)}, 宮津裕次^{A)}, 西尾悠平^{B)}, 諸岡聡^{C)}, 向井智久^{D)}, 兼松学^{A)},

Ayumu Yasue^{A)}, Kensuke Kobayashi^{A)}, Reoma Yamamoto^{A)}, Junho Kim^{A)}, Yuji Miyazu^{A)}, Yuhei Nishio^{B)}, Satoshi Morooka^{C)}, Tomohisa Mukai^{D)}, Manabu Kanematsu^{A)}

^{A)} Tokyo University of Science

^{B)} Building Research Institute

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

^{D)} National Institute for Land and Infrastructure Management

Abstract

In this study, the effect of the rib pattern of rebar on the bond performance was investigated by evaluating three types of deformed rebar with different rib patterns. In detail, the bond stress-slip curve and the rebar stress distribution was evaluated by pull-out test and by Neutron Diffractometer for Residual Stress Analysis (RESA) respectively. The relationship between measurement time and accuracy of stress measurement was also examined for the reinforced concrete specimens. Experimental results showed that the standard deviation of rebar stress was inversely proportional to the measurement time, and that the standard deviation was less than 10 N/mm² when the measurement time was 20 minutes or longer. The results of the pull-out tests showed that the ratio of rib spacing to height had a dominant effect on the bond stress of rebars with different rib patterns. Furthermore, it was inferred that the rib pattern of the rebars affects the shape of the bond stress-slip curve. On the other hand, the effect of the rib pattern on the stress distribution in the rebar was found to be small, and the reasons for this are discussed.

Keyword: bond, neutron diffraction, rib pattern, pull-out test, rebar stress distribution

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において一般的に用いられる異形鉄筋は、鉄筋表面の凹凸(節やリブ)がコンクリートと機械的に噛み合うことにより、強力な付着性能を発揮している。JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」には、異形鉄筋の形状について、(1)節の間隔、(2)節の高さ、(3)節のすき間の和および(4)節と鉄筋軸のなす角度についての規定が存在する。これまでに、異形鉄筋の節形状が付着性能に及ぼす影響に関する研究は、節の高さや間隔、節と鉄筋軸のなす角度について多くの検討がなされており^{[1]-[6]}、特に節の間隔(L)と高さ(H)の比(H/L)が付着性能に影響を及ぼすことが明らかとなっている。

しかし、市販の異形鉄筋においては、表面形状は製造会社により異なる。また、これらの表面形状が付着性能に及ぼす影響は不明瞭な点が多い。藤井ら^[7]や朱ら^[8]は、市販の異形鉄筋を対象に引抜試験を実施し、表面形状により付着性能が異なることを報告している。したがって、異形鉄筋とコンクリートの付着性能をより詳細に理解する上では、表面形状が付着性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

鉄筋とコンクリートとの付着性能評価手法に着目すると、近年、完全非破壊・非接触かつ高精度でコンクリート内部の鉄筋応力を測定可能である中性子回折法の利用が進んでいる^{[9]-[13]}。従来の測定方法であるひずみゲージ法^{[14]-[16]}では、ゲージの貼付やリ

ード線の取扱い自体が付着性能に影響を及ぼすことが懸念される。特に、本研究で対象とする、表面形状の異なる異形鉄筋においては、ゲージの貼付箇所において付着切れが生じた場合に、表面形状に起因する付着性能の差異を正確に比較検討することが困難となる可能性がある。したがって、表面形状に影響を与えることなく、鉄筋応力の測定が可能な中性子回折法は、表面形状の異なる異形鉄筋の付着性能評価において極めて価値の高い測定手法となる。

これまで厳密な測定方法の無かった表面形状が付着性能に及ぼす影響を明らかにすることができれば、これまででは想定されなかった新たな鉄筋形態の探索が可能となることが期待され、その意義は大きい。

本研究では、応力測定技術に基づくコンクリート用補強材の形態最適化を究極の目標とし、鉄筋の表面形状が付着性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、表面形状の異なる3水準の異形鉄筋を対象に、引抜試験および中性子回折法による鉄筋応力測定を行った。なお、鉄筋コンクリート試験体を対象とした中性子回折法の適用においては、かぶりコンクリートが中性子の透過性を著しく低下させることが知られており、試験体仕様ごとに測定時間に関する配慮が必要となる^{[10],[17]}。そこで、本研究ではまず、測定時間と測定精度の関係を検討した後に、前述した表面形状の異なる異形鉄筋の付着性能評価を行った。

[21036]

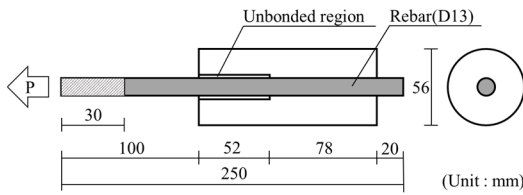


Figure 1. Specimen (Chapter 2)

Table 1. Materials used (Chapter 2, Chapter 4)

	Types・Remarks
Water (W)	Deionized water
Cement (C)	High early strength portland cement Density : 3.14g/cm ³
Fine aggregate (S)	Oi river system land sand Absolute dry density : 2.58g/cm ³
Coarse aggregate (G)	Crushed stone from Oume Maximum particle size : 10mm Absolute dry density : 2.66g/cm ³
Chemical admixture (Ad)	Standard type

Table 2. Mix proportion (Chapter 2)

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad (g)	Slump (cm)	Air (%)	σ (Test day) (N/mm ²)	E (Test day) (kN/mm ²)
		W	C	S	G					
55	46	175	318	805	975	C×2.0%	20.0	4.8	44.0	26.2

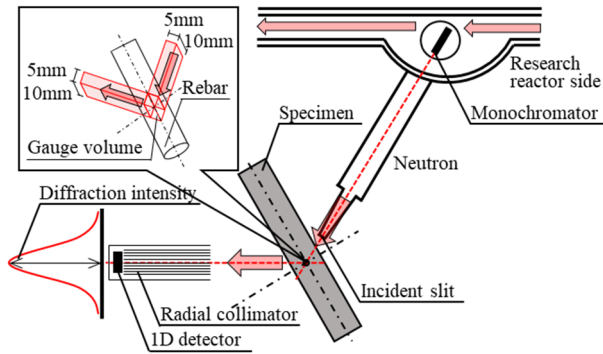


Figure 2. Overview of the RESA

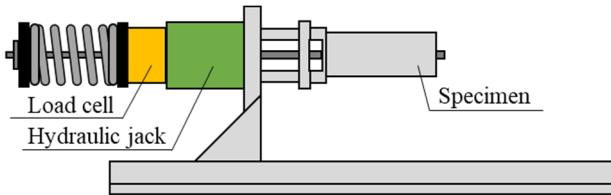


Figure 3. Overview of loading equipment

2.2 測定方法および载荷方法

(1) RESA による鉄筋ひずみ・応力測定

鉄筋ひずみの測定は、日本原子力研究開発機構の JRR-3 に設置されている中性子応力測定装置 (diffractometer for RESidual Stress Analysis : 以下, RESA)を用いた。RESAは角度分散法を用いた測定装置である。中性子線は個々の原子に当たると散乱する性質を有している。一方で、式(1)のブラッグの回折条件式を満たす場合には、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

λ : 入射中性子線の波長

ここで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)を微分することにより、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

以上より回折角の変化 $\Delta\theta$ を測定することで、弾性ひずみの算出が可能となる。本実験では、式(2)により求めた鉄筋軸方向の弾性ひずみに、回折弾性係数 (20.0 kN/mm²) を乗じることで鉄筋応力を算出した。

RESA による鉄筋ひずみの測定概要を Figure 2 に示す。原子炉から取り出された単一波長の熱中性子線は、入射スリットにより整形された後、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、回折角ごとに一定時間で飛来する中性子数を計測している。本研究では、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、回帰分析をすることによりピーク回折角 2θ を得た。また、式(1)より回折角から格子面間隔 d を求めることで、式(2)より格子ひずみ ε を決定した。

2. 測定時間が鉄筋応力測定に及ぼす影響

2.1 試験体概要

本実験で用いた試験体の概要を Figure 1 に示す。試験体は、φ56×130mm のコンクリート母材の中心部に、長さ 250mm の鉄筋を配置し作製した。図中に示す非付着区間は、打設時に配置したゴムホースを、コンクリートの硬化後に引抜くことにより作製した (3 章、4 章も同様とした)。試験体数は 1 体である。

コンクリートの使用材料および調合を Table 1 および Table 2 に示す。試験体は打設後 24 時間で脱型し、材齢 7 日まで 20℃ の水中養生を行った。水中養生終了後の試験体は、20℃RH60% の環境で 24 時間の乾燥を行った後に、材齢 21 日まで 40℃ の機械乾燥、および材齢 28 日まで 60℃ の機械乾燥を実施した。試験は、材齢 29 日において実施した。

[21036]

実際に RESA で測定される範囲は Figure 2 に示す四角柱部分(ゲージ体積)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ーの幅により決定される。本実験におけるゲージ体積は, $5.0 \times 5.0 \times 10 \text{ mm}^3$ であり, 弾性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, 中性子線の波長は $2.08 \text{ \AA}$ とした。

(2) 载荷方法および測定条件

Figure 3 に, 本実験に用いた载荷装置の概要を示す。载荷装置に固定した油圧ジャッキにロードセルおよび皿バネを配置し, それらに鉄筋を延長したロッド

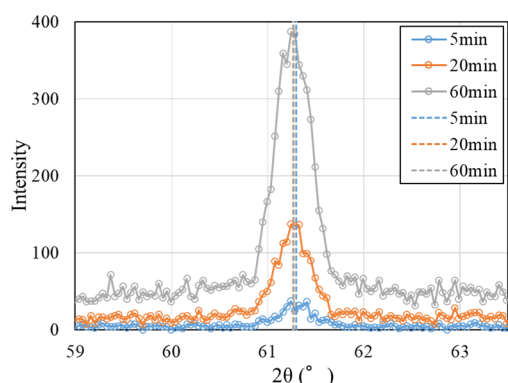
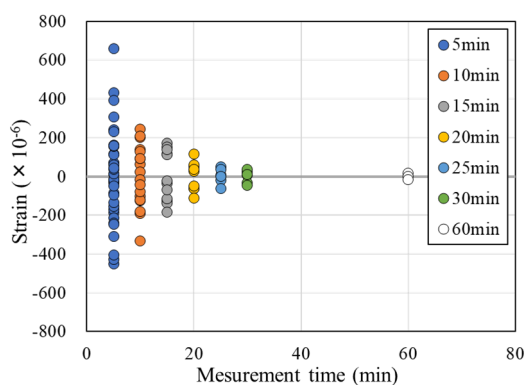
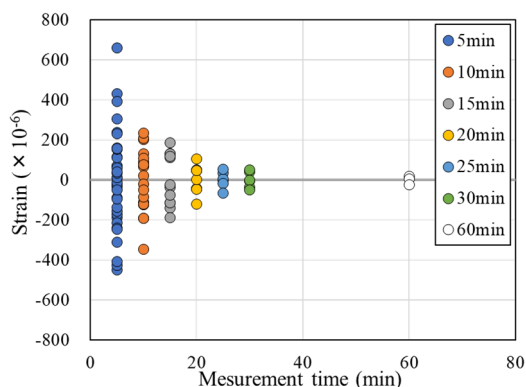


Figure 4. Relationship between Intensity and diffraction



(A) Analysis by average



(B) Analysis by addition

Figure 5. Relationship between strain and measurement time

を通して, 試験体の片側を固定した。ジャッキによりバネを押し込むことで鉄筋に引張力を導入した。

測定位置は, 付着区間の始まりから 26 mm の位置とした。本実験においては, 鉄筋に 23.7 N/mm^2 を载荷した状態において, 5 分×36 回の測定を実施した。

2.3 実験結果および考察

Figure 4 に強度と回折角の関係の一例を示す。図中の破線は, 測定時間ごとのフィッティングにより求められたピーク回折角 2θ に対応する。図より, 測定時間の増加に伴い回折角度のピークが顕著になる。

また, Figure 5 に鉄筋ひずみと測定時間の関係を示す。Figure 5(A)は, 5 分間の測定で得られた 2θ を n 回分(例えば, 30min においては $n=6$)で平均することにより算出されたひずみである。一方で, Figure 5(B)は, 5 分間の測定で得られた回折強度を n 回分加算することにより得られた, 回折強度と回折角の関係を回帰分析することで算出された鉄筋ひずみである。なお, 本検討では 5 分間の測定で得られた 36 回分の 2θ を平均することにより算出されたひずみを 0 とすることで, 各測定時間によるばらつきを検討した。

Figure 5(A)および(B)を比較すると, 算出された鉄筋ひずみのばらつきは分析方法によらずおおむね同程度であることが分かる。このことから, 鉄筋ひずみの測定精度は, 分析方法によらず測定時間に依存することが分かる。

Figure 6 に, Figure 5 の結果より算出した鉄筋応力の標準偏差と測定時間の関係を示す。図より, 標準偏差と測定時間はおおむね反比例の関係にあることが分かる。また, 測定時間が 20 分より長くなると, 標準偏差は 10 N/mm^2 以下となることから, 4 章においては, 1 点あたりの測定時間が 20 分以上となるよう配慮した。なお, 本実験における载荷応力は 23.7 N/mm^2 であり, 従来の研究^{[10]-[13], [17]}と比較しても非常に小さな値である。これまでに, 鉄筋ひずみの小さい領域においては, 中性子回折法によるひずみ測定精度が悪化する可能性があることが示されている^[13]。したがって, 今後測定時間と測定精度の関係をより詳細に検討する上では, 高応力下における測定精度についても, 別途詳細な検討が必要であると考えられる。

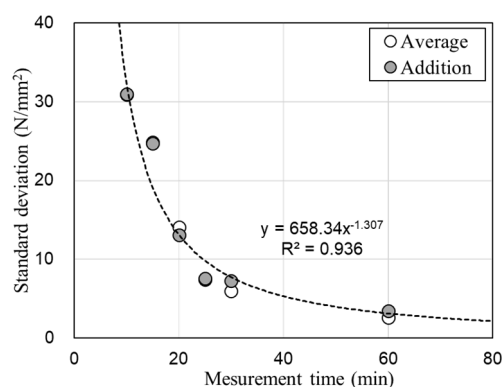


Figure 6. Relationship between standard deviation and measurement time

[21036]

3. 表面形状が鉄筋コンクリートの付着性能に及ぼす影響(引抜試験)

3.1 実験水準

実験水準は、異形鉄筋の表面形状、鉄筋径およびらせん筋の有無とした。Figure 7 に各鉄筋の表面形状を、Table 3 に各鉄筋の形状(寸法)および力学特性を示す。なお、表中の寸法は、JIS G 3112 に準じて測定した値である。

3.2 試験体概要

引抜試験に用いた試験体の概要を Figure 8 に示す。試験体は、JSTMC 2101「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法」に準拠して寸法および付着区間の長さを決定した。なお、試験体数は 1 水準につき 3 体である。

コンクリートの使用材料および調合を、Table 4 および Table 5 に示す。試験体は、打設後 24 時間で脱型し、材齢 28 日まで 20℃の水中養生を行った。水中養生終了後の試験体は、表面乾燥飽水状態を維持したまま引抜試験とした。なお、コンクリートの打設方向は、鉄筋軸と垂直とした。

3.3 引抜試験

引抜試験の概要を Figure 9 に示す。载荷にはオックスジャッキ製あと施工アンカー用引張試験機を用いた。まず、試験体を試験台の上に設置し、鉄筋に

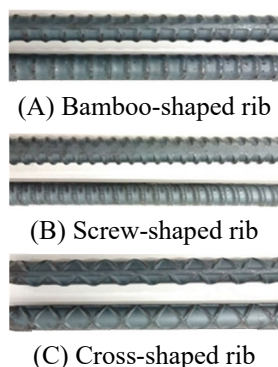


Figure 7. Rib pattern

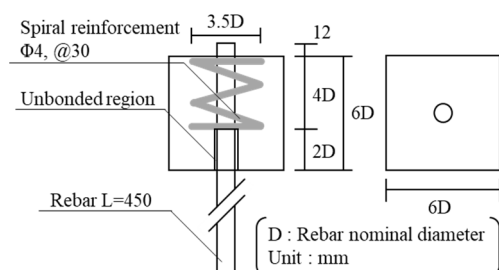


Figure 8. Pull-out specimen

引張試験機を差し込んだ。その後、引張試験機をコンクリート試験体に密着させ、手動油圧ポンプにより加圧を行った。この際、载荷速度は引張応力の増加速度が 49.0 N/mm²/分となるように制御した。なお、試験体の鉄筋自由端部においては変位計により鉄筋の引き抜け量(自由端すべり量)を測定した。得られた測定結果を用いて、式(3)により付着応力を算出した。

$$\tau = \frac{P}{\pi DL} \alpha \quad (3)$$

ここで、 τ : 付着応力

P : 引張荷重

D : 鉄筋公称直径

本実験では、JSTM C 2101 に準拠し、自由端すべり量が 0.002D 時($S_f=0.002D$)の付着応力(初期剛性)および引張荷重が最大時($\tau_{\max}$)の付着応力(最大付着応力)に着目し実験結果の議論を行う。なお、本実験における試験体の破壊形態は、らせん筋を有する試験体においては引抜破壊、らせん筋を有していない試験体においては割裂破壊であった。

3.4 実験結果および考察

Figure 10 および Figure 11 に各水準、3 体の試験体により得られた付着応力-自由端すべり量曲線(以下、 τ - s 曲線)を示す。また、Figure 12 および Figure 13 には、各水準の初期剛性および最大付着応力を示す。ここで、図中の値は、各水準 3 体の試験体の測定結果を相加平均した値である。

竹節とクロス節の測定結果に着目を見ると、D13 におけるクロス節の付着応力は竹節と比較して大き

Table 3. Shape of each rebar

		Nominal diameter (mm)	Rib average spacing [L] (mm)	Rib high [H] (mm)	Sum of the rib gap (mm)	H/L
D13	Bamboo	12.7	8.16	0.56	6.57	0.069
	Screw		7.36	0.97	5.83	0.132
	Cross		7.61	0.73	4.42	0.096
D16	Bamboo	15.9	10.42	1.04	7.87	0.100
	Screw		8.22	1.18	8.93	0.144
	Cross		9.35	0.84	6.65	0.090

Table 4. Materials used (Chapter 3)

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

Table 5. Mix proportion (Chapter 3)

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad (g)	Slump (cm)	Air (%)	σ (28 day) (N/mm ²)	E (28 day) (kN/mm ²)
		W	C	S	G					
60	46	175	294	808	993	C×1.8%	20.0	5.3	35.2	25.0

[21036]

い。一方で、D16 における竹節の付着応力はクロス節と比較して大きい。また、この傾向はらせん筋の有無にかかわらず同様である。これは、Table 3 に示すように、D13 の鉄筋における、節の平均間隔と高さの比(以下、「H/L」とする)は竹節と比較してクロス節の方が大きい一方で、D16 の H/L はクロス節と比較して竹節の方が大きいことに起因する。したがって、鉄筋の表面形状が付着性能に及ぼす影響は、その表面の形状にかかわらず、H/L が支配的な要因となることが推察される。

つぎに、ねじ節の測定結果に着目をする。Figure 12 および Figure 13 から分かるように、らせん筋を有する試験体におけるねじ節の最大付着応力は、鉄筋径

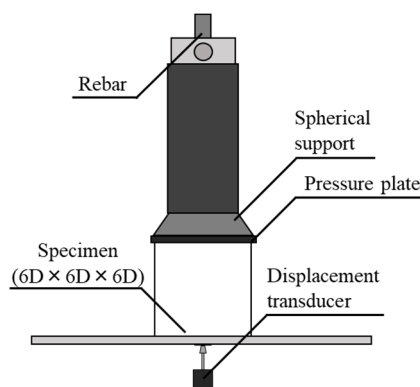


Figure 9. Overview of pull-out test

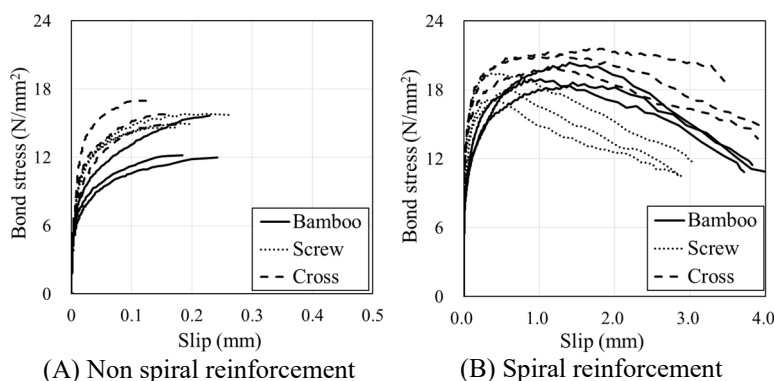


Figure 10. Bond stress-slip (D13)

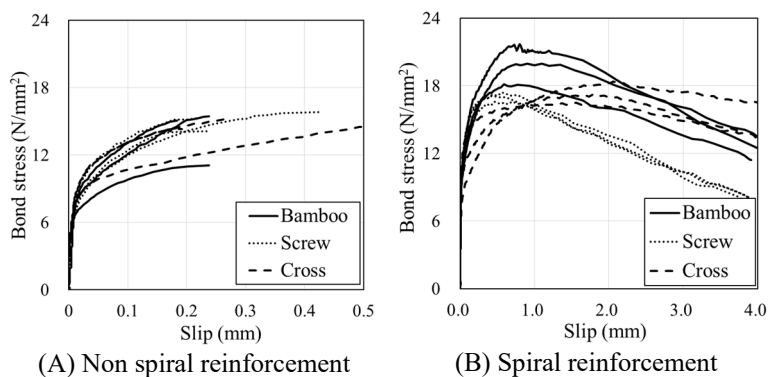


Figure 11. Bond stress-slip (D16)

によらず、そのほかの表面形状と比較して小さい。これには、付着挙動により生じるコンクリートの破壊が影響を及ぼしたと推察される。これまでに、Lutz ら^[3]は、節と鉄筋軸のなす角度が 40°以上で H/L が 0.14 より大きい場合、鉄筋界面のコンクリートに節頂部を結ぶせん断破壊が生じることを報告している。本研究におけるねじ節の H/L は、そのほかの鉄筋と比較して著しく大きく (Table 3 参照)、節頂部をつなぐコンクリートのせん断破壊が生じやすいと考えられる。すなわち、H/L の大きいねじ節鉄筋においては、そのほかの鉄筋と比較して早期にコンクリートの破壊が生じ、付着が損失することにより、最大付着応力が小さくなったと推察される。なお、らせん筋を有していない試験体は、破壊形態が割裂破壊となることからこの限りでない。

一方で D16 において、らせん筋を有している試験体の初期剛性、およびらせん筋を有していない試験体の測定結果については、ねじ節はそのほかの表面形状と比較して最も大きな値を示している。また、D13 においても、これらの測定結果はクロス節に次いで大きな値となっている。このように、ねじ節において、らせん筋を有している試験体の最大付着応力を除く測定結果が大きな値を示した理由として、H/L が大きいことが挙げられる。国分ら^[4]は、太径鉄筋を対象とした既往の研究において、自由端のすべ

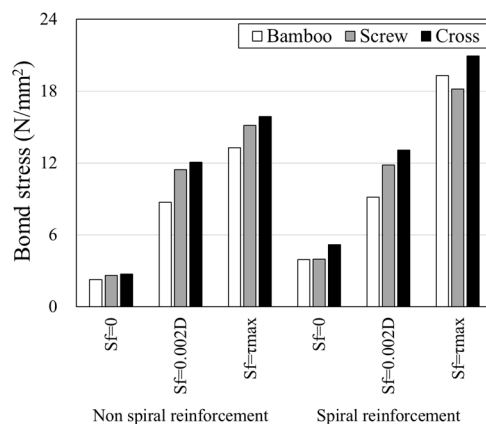


Figure 12. Bond stress (D13)

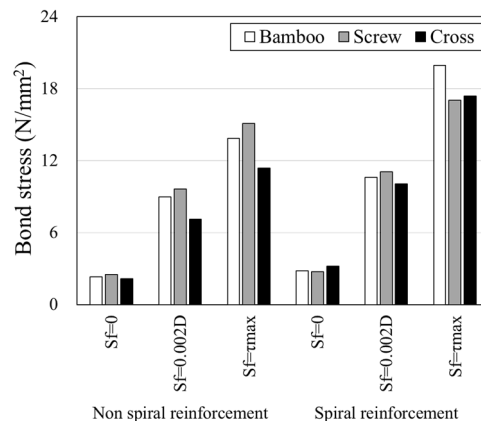


Figure 13. Bond stress (D16)

[21036]

り量が大きくなると付着応力と支圧面積係数(H/L に近い指標)の直線関係が不明瞭となることを示している。このことから、 H/L の大きい鉄筋は、自由端すべり量が小さい範囲においては十分な付着性能を発揮する一方で、コンクリートに破壊が生じるレベルの荷重が加わった際には、付着応力が十分に発揮されないことが推察される。

τ - s 曲線の概形に着目を見ると、最大付着応力以降の付着応力の低下は、ねじ節、竹節、クロス節の順に大きい。これにも、前述した破壊形態が影響を及ぼしたと推察される。すなわち、ねじ節の鉄筋においては、節頂部をつなぐせん断破壊が生じやすく、最大付着応力以降に十分な付着応力を残存し得ないことから、付着応力の低下が顕著であると考えられる。また、クロス節については、その独特の形状から、局所的に H/L の大きな領域および小さな領域を有していることが分かる。したがって、 H/L の大きな領域において前述のせん断破壊が生じず、自由端すべり量の大きい領域においても高い付着応力を保持することから、クロス節の付着応力の低下は小さくなると推察される。

以上より、表面形状の異なる異形鉄筋の付着応力については、節の間隔と高さの比が支配的に影響を及ぼすことが明らかとなった。一方で、 τ - s 曲線の概形については、 H/L に加えて異形鉄筋の表面形状も影響を及ぼすことが推察される。

4. 表面形状が鉄筋コンクリートの付着性能に及ぼす影響(中性子回折法)

4.1 実験水準

実験水準は、3.1 に示した 3 水準の異形鉄筋の表面形状とした。なお、本章では D13 の異形鉄筋を対象としている。

4.2 試験体概要

中性子回折法に用いた試験体の概要を Figure 14 に示す。試験体は、 $\phi 56 \times 350$ mm のコンクリート母材の中心部に、長さ 460 mm の鉄筋を設置することで作製した。なお、試験体数は、1 水準につき 1 体である。

る。

コンクリートの使用材料は、2 章と同様である。コンクリートの調合および力学特性を Table 6 に示す。試験体は、打設後 24 時間で脱型を行い、材齢 7 日まで 20°C の水中養生を行った。その後、14 日間の 40°C 乾燥および 14 日間の 60°C 乾燥を実施した。乾燥終了後の試験体は、アルミホイルおよびアルミテープで密封し、吸湿を防止した。試験は、材齢 36 日より実施した。なお、コンクリートの打設方向は、鉄筋軸と水平方向とした。

4.3 測定方法および载荷方法

(1) RESA による鉄筋ひずみ・応力測定

RESA による応力測定の原理は、2 章と同様である。なお、コンクリートは乾燥により収縮が生じることから、4.2 節で示した乾燥過程を経た鉄筋コンクリート試験体においては、鉄筋に負荷が生じることが推察される。そこで本実験では、初期に導入されていた乾燥収縮等の影響を除去することを目的として、低応力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。

なお、本実験におけるゲージ体積は、 $5.0 \times 5.0 \times 10 \text{ mm}^3$ 、測定する回折面は(110)面、中性子線の波長は $2.00 \text{ \AA}$ とした。

(2) 载荷方法および測定条件

载荷方法は 2 章と同様である。本実験においては、1 応力あたりの測定時間が 10 時間程度となることから、測定時間中におけるクリープによる応力緩和が懸念されるが、皿バネによりその影響を抑制した^[10]。

Figure 14 に、応力測定位置を示す。応力測定位置は、非付着区間 1 点を含む、計 33 点とした。1 点あたりの測定時間は 2 章を参考とし、竹節およびねじ節では 20 分とした。なお、クロス節については、マシントイムの関係上、1 点あたりの測定時間を 15 分とした。目標载荷応力は、SD295 鉄筋の長期許容応力度にあたる 195 N/mm^2 とし、低応力(7.9 N/mm^2)を負荷した状態との差分をとることにより実験結果の鉄筋応力分布を得た。

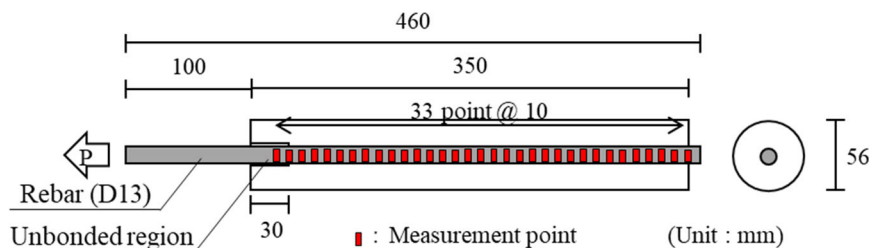


Figure 14. RESA specimen and Measurement point

Table 5. Mix proportion (Chapter 4)

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)				Ad (g)	Slump (cm)	Air (%)	σ (28 day) (N/mm^2)	E (28 day) (kN/mm^2)
		W	C	S	G					
55	46	175	318	805	975	C $\times$ 2.0%	20.0	5.3	45.0	27.4

[21036]

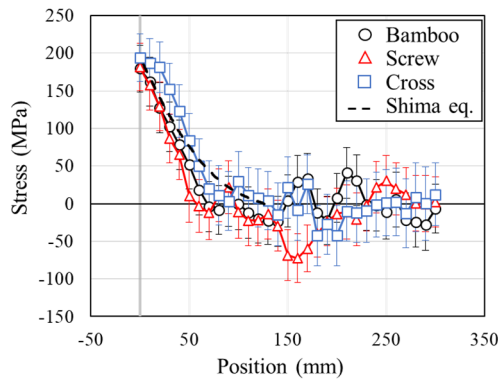


Figure 15. Rebar stress distribution (RESA)

4.4 実験結果および考察

Figure 15 に RESA で測定したひずみ分布より算出した鉄筋の応力分布(縦軸は鉄筋応力度, 横軸は非付着区間からの距離)を示す。なお, 図中に示す各点の値は前後 3 点の移動平均値である。また, 図中の誤差範囲は格子面間隔の算出過程におけるガウス分布とのフィッティング誤差である。

さらに, 図中には島ら^[16]の τ - s 関係式(式(4))を逐次積分することにより算出した鉄筋応力分布を示す。なお, 逐次積分の詳細については, 文献^{[15],[18]}を参照されたい。

$$\tau = 0.9f'_c \frac{2}{3} (1 - e^{-40s^{0.6}}) \quad (4)$$

ここで, $s = 1000(S/D)$

f'_c : コンクリートの圧縮強度

S : すべり量

D : 鉄筋径

図から分かるように, $X=0$ mm における測定結果は, 導入応力とおおむね同程度の値である。また, 測定された応力分布は逐次積分により算出された応力分布とおおむね同程度である。このことから, 中性子回折法により高精度で鉄筋応力の測定が可能であることが示された。一方で, 鉄筋応力の減少勾配が極めて小さくなる $X \leq 100$ mm の区間においては, 測定された応力が 0 N/mm^2 から大きくばらつく傾向にある。2.3 節でも述べた通り, 低ひずみ領域においては, 中性子回折法の測定精度が悪くなることが示唆されており^[13], 本実験においても同様の理由から測定された応力にばらつきが生じたと推察される。

水準毎の鉄筋応力の減少勾配に着目を見ると, 鉄筋応力の減少勾配はクロス節, 竹節, ねじ節の順に大きくなる傾向にあるものの, 水準毎に顕著な差異はみられない。なお, クロス節の付着長が大きな値を示した理由としては, $X \leq 10$ mm の測定点において, 鉄筋応力の減少がみられないことが影響したと考えられる。試験終了後に測定した, クロス節の試験体においては, 非付着区間が計画長さより 4 mm 程度大きかったことから, クロス節の付着長には非付着区間の作製精度が影響を及ぼしたと推察される。

4.5 すべりの有無が付着挙動に及ぼす影響

表面形状が付着性能に及ぼす影響に着目した本研究において, 3 章にて実施した引抜試験においては, 表面形状毎に付着性能に差異がみられたのに対して, 本章にて実施した中性子回折法においては, 測定された応力分布の概形に顕著な差異はみられなかった。本研究の 3 章および本章においては, それぞれ試験体の付着区間長さが大きく異なることから, 各章にて算出した付着応力を直接比較, 検討することは適切でない。したがって, 本章では実験的事実に基づき, 表面形状が付着性能に及ぼす影響のみに着目することで議論を行う。

本研究における 2 種の実験の差異は, 試験体の仕様および打設方向の違いにある。また, 試験体の仕様については, 試験体の形状や付着区間の長さが挙げられる。本研究の引抜試験においては, 付着区間が 4D(Figure 9)の試験体を用いた一方で, 中性子回折法においては, 付着区間が 300 mm(Figure 14)の試験体を用いた。3 章の実験結果からも分かるように, 付着区間が短い試験体においては, 特に高荷重下において自由端すべりが生じる。一方, 付着区間が十分に長い試験体においては, 同程度あるいはそれ以上の高荷重下においても自由端すべりは生じない。引抜試験の結果は, 一般的に自由端すべりが生じた以降の付着応力により議論されることから, 本研究においては, 引抜試験の結果についても, 自由端すべり量が $0 \text{ mm}(S_f=0 \text{ mm})$ における付着応力に着目をした。

Figure 12 および Figure 13 には, $S_f=0 \text{ mm}$ の付着応力を示す。 $S_f=0 \text{ mm}$ において, 鉄筋の表面形状が付着性能に及ぼす影響は, $0.002D$ 時や最大応力に比べ小さいことがわかる。このことから, 自由端すべりが生じない状態において, 鉄筋の表面形状が付着性能に及ぼす影響は小さいことが推察される。なお, 本考察については, $S_f=0 \text{ mm}$ の付着応力そのものが小さいことに起因するとも考えられることから, 詳細な検討については今後の課題とする。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 中性子回折法による鉄筋ひずみの測定精度は, 分析方法によらず, 測定時間に依存する。
- 2) 鉄筋応力の標準偏差と測定時間はおおむね反比例の関係にある。また, 本研究の試験体においては, 測定時間が 20 分より長くなると, 測定された応力の標準偏差は 10 N/mm^2 以下となった。
- 3) 表面形状の異なる異形鉄筋の付着応力については, 節の間隔と高さの比(H/L)が支配的に影響を及ぼす。一方で, τ - s 曲線の概形については, H/L に加えて異形鉄筋の表面形状も影響を及ぼすことが推察された。
- 4) 本研究において, 鉄筋に自由端すべりが生じない条件下では, 付着性能に及ぼす表面形状の影響は小さかった。
- 5) 鉄筋に自由端すべりが生じる条件下では, 鉄筋の

[21036]

表面形状が付着性能に影響を及ぼすことが推察された。

今後は、表面形状が付着性能に影響を及ぼす測定条件や境界条件等を詳細に検討し、鉄筋の形状と付着性能の関係を明らかにする。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H02302 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] A. P. Clark, “Comparative bond efficiency of deformed concrete reinforcing bars”, ACI Journal, Vol.43, No.4, pp.381-400, 1946
- [2] A. P. Clark, “Bond of concrete reinforcing bars”, ACI Journal, Vol.46, No.3, pp.161-184, 1949
- [3] L. A. Lutz and P. Gergely, “Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete”, ACI Journal, Vol.64, No.11, pp.711-721, 1967
- [4] 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
- [5] 村田二郎, 河合紘茲, “引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究”, 土木学会論文報告集, Vol.1, No.348, pp.113-122, 1984
- [6] G. Metelli, G. A. Plizzari, “Influence of the relative rib area on bond behaviour”, Magazine of Concrete Research, Vol.66, No.6, pp.277-294, 2014
- [7] 藤井栄, 李竜善, 森田司郎, “鉄筋表面の異形形状が付着割裂特性に及ぼす影響”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.653-654, 1994
- [8] 朱塵, 藤井栄, 森田司郎, “表面ふし形状の異なる市販異形鉄筋の付着割裂特性”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.607-608, 1996
- [9] 秋田貢一, 鈴木裕士, “中性子回折による残留応力測定”, RADIOISOTOPES, Vol.59, No.12, pp.741-750, 2010
- [10] 楠浩一, 梶山健二, 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
- [11] 鈴木裕士, 楠浩一, 佐竹高祐, 兼松学, 小山拓, 丹羽章暢, 梶山健二, 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, Vol.67, No.4, pp.180-186, 2018
- [12] 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
- [13] 笹本潤平, 向井智久, 鈴木裕士, 南部禎士, 有木克良, 伊藤成胤, 衣笠秀行, “接着系あと施工アンカーの中性子ビームを使用した革新的計測技術の精度検証 その2 中性子回折法を使用した鉄筋歪の評価”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.111-112, 2021
- [14] D. E. McHenry and W. T. Walker, “Laboratory measurements of stress distribution in reinforcing steel”, ACI Journal, Vol.44, No.6, pp.1041-1054, 1948
- [15] 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎, “鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 : (I 付着応力分布について) (I)”, 日本建築学会論文報告集, No.131, pp.1-8, 1967
- [16] 島弘, 周礼周, 岡村甫, “マッシュ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, Vol.6, No.378, pp.165-174, 1987
- [17] 兼松学, 太田匠美, 鈴木裕士, 野口貴文, “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”, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1853-1858, 2011

- [18] 日本コンクリート工学会, “コンクリートと補強材の付着定着挙動と構成則の利用研究委員会報告書”, p.110, 2011