

[2023105203]

## 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 Shape Optimization of Rebars for Concrete Based on Stress Measurement Technology

川上真由<sup>#A)</sup>, 最上和樹<sup>B)</sup>, 小林謙祐<sup>A)</sup>, KIM JUNHO<sup>A)</sup>, 宮津裕次<sup>A)</sup>, 向井智久<sup>C)</sup>, 諸岡聡<sup>D)</sup>, 兼松学<sup>A)</sup>  
Mayu Kawakami<sup>#A)</sup>, Kazuki Mogami<sup>B)</sup>, Kensuke Kobayashi<sup>A)</sup>, Junho Kim<sup>A)</sup>, Yuji Miyazu<sup>A)</sup>, Tomohisa Mukai<sup>C)</sup>,  
Satoshi Morooka<sup>D)</sup>, Manabu Kanematsu<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Tokyo University of Science,

<sup>B)</sup> Taisei Corporation,

<sup>C)</sup> National Institute for Land and Infrastructure Management,

<sup>D)</sup> Japan Atomic Energy Agency

### Abstract

In this study, to clarify the effect of the coating thickness of hot-dip galvanized rebars and the effect of the rebar deformation on the bond performance to concrete, the bond test by neutron diffraction method is conducted for three types of hot-dip galvanized rebars with different coating thicknesses and metal rebar with different shapes. Furthermore, as part of efforts to progress the use of neutron diffraction technology, the bond test by neutron diffraction method on deformed rebars with different diameters. As a result, it was clarified that the effect of the coating thickness of hot-dip galvanized rebars on rebar stress distribution was small. Also, it was shown that bond performance is improved in rebar with mechanical anchoring. Moreover, the effect of rebar diameter on the diffraction intensity and rebar stress distribution was small, and it was possible to study rebars of D16 in addition to D10 and D13 in bond performance evaluation by neutron diffraction.

Keyword: guideline, layout, font

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造は、鉄筋とコンクリートが相互に力を伝達し合い荷重に耐える複合構造であり、鉄筋-コンクリート間の付着応力によって、その性能を発揮している。しかしながら、コンクリートに埋設された鉄筋は外部からの飛来塩分やコンクリートの中性化により腐食する。したがって、鉄筋の断面積が減少するとともに、鉄筋-コンクリート間の付着性能の低下につながる。

これに対して、鉄筋の耐腐食性の向上を目的として、溶融亜鉛めっき鉄筋が開発され実用化されている<sup>[1]</sup>。これまでに、普通鉄筋と溶融亜鉛めっき鉄筋の付着性能の差異に関する研究が報告され<sup>[2][4]</sup>、2022年には日本建築学会において「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針・同解説」<sup>[5]</sup>が刊行され、実用化が進んでいる。一方、溶融亜鉛めっき鉄筋のより一層の普及に向けては、様々な条件下におけるさらなる検討が不可欠である。溶融亜鉛めっき鉄筋においては、一般に80 $\mu$ m~170 $\mu$ m前後の亜鉛皮膜が形成されるが、その膜厚の差が付着性能に及ぼす影響の検討は十分でない。したがって、現在平均膜厚が77 $\mu$ m~166 $\mu$ mと一義的に定められている溶融亜鉛めっき鉄筋を対象として検討を行うことで、溶融亜鉛めっき鉄筋が付着性能に及ぼす影響をより詳細に評価することが可能となると考えられる。

さらに、3Dプリンティング/3DPプリンタ(3DP)の普及や新材料および新工法の提案に伴い、将来的な複合構造物の補強方法、配筋方法、および補強材の形状は従来のRC構造物と比較して複雑となることが予測される。したがって、現在多用されている表

面形状の異なる異形鉄筋のみならず、断面や形状そのものを変化させた補強材に着目をし、自由な形状の補強材が付着挙動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。ここで、既往の研究においては、表面形状の異なる異形鉄筋の付着挙動評価に対する中性子回折法の適用性が報告されている。一方で、自由な形状の補強材の付着挙動評価に対して中性子回折法を適用した事例は存在しない。

鉄筋とコンクリートの付着性能評価方法に着目すると、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<sup>[6][10]</sup>。従来の測定方法であるひずみゲージ法<sup>[11][13]</sup>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。さらに、ひずみゲージの貼付においては、ゲージの処理やその配線が付着を妨げるため、正確な付着性能の評価は困難である。したがって、中性子回折法においては、鉄筋とコンクリートの付着性能へ影響を与えることなく、鉄筋応力分布の測定が可能である。これまで、中性子応力測定装置を用いて行われてきた中性子回折法による付着試験においては、鉄筋およびコンクリートに対する中性子線の透過性の観点から、D10(D:鉄筋径)やD13など鉄筋径の小さい鉄筋が使用されてきた。一方、実構造物に使用されている鉄筋はD16やD19以上であるため、より大きい鉄筋径を有する鉄筋を対象に、中性子回折法による付着挙動評価の検討が必要となる。しかしながら、D16以上の鉄筋に対して中性子回折技術を適用した事例は少ない。

本研究では、溶融亜鉛めっき鉄筋のめっき膜厚が付着性能に及ぼす影響および補強材の形状が付着性

[2023105203]

能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、めっき膜厚の異なる 3 種類の溶融亜鉛めっき鉄筋および形状そのものを変化させた金属補強材を対象に、中性子回折法による付着試験を実施した。さらに、中性子回折技術の利用向上の一環として、鉄筋径の異なる異形鉄筋を対象に、中性子回折法による付着試験を実施した。

## 2. 溶融亜鉛めっき鉄筋の膜厚が付着性能に及ぼす影響

### 2.1 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

$\theta$  : 回折角

$n$  : 回折次数

$\lambda$  : 入射中性子の波長

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、 $\varepsilon$  : 弾性ひずみ

$d_0$  : 初期状態の格子面間隔

$\theta_0$  : 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。

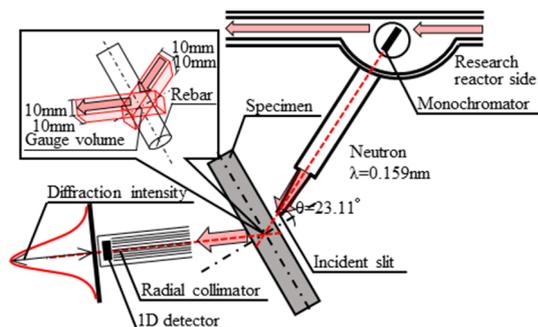


Fig.1 Strain Measurement Outline

RESA の概要を Fig.1 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よりピーク回折角  $2\theta$  を算出した。式(1)より回折角から格子面間隔  $d$  を求め、式(2)より弾性ひずみ  $\varepsilon$  を算出した。

実際に RESA で測定される範囲は Fig.1 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。

### 2.2 実験水準

実験水準は、溶融亜鉛めっき鉄筋のめっき皮膜の膜厚とした。なお、溶融亜鉛めっき鉄筋との比較として、普通鉄筋を加えて検討した。また、めっき皮膜の平均膜厚は、耐食性および付着性等機能性の観点から、77~166μm を標準として製造されている。本実験においては、実際の膜厚のばらつきを考慮し 70μm、120μm、170μm の 3 水準について検討を行った。なお、鉄筋は JIS G 3112 に基づく市販の D13(D:鉄筋径)異形鉄筋(SD295)とした。ここで、本実験に使用しためっき鉄筋について、電磁式膜厚計を用いて測定しためっき膜厚の測定結果を Fig.2 に示す。Fig.2 に示す値は各水準における 15 本の鉄筋×5 点計測(=計 75 点)の平均値であり、図中のエラーバーは標準偏差を示す。

### 2.3 試験体の概要

試験体の概要を Fig.3 に示す。試験体は、Fig.3 に示すコンクリート母材に長さ 450mm の異形鉄筋を配置することで作製した。鉄筋とコンクリートの付着区間は 300mm とし、載荷端側には 30mm の非付着区間を設けた。非付着区間は、打設時に設置したゴムホースを脱型時に抜き取ることにより作製した。

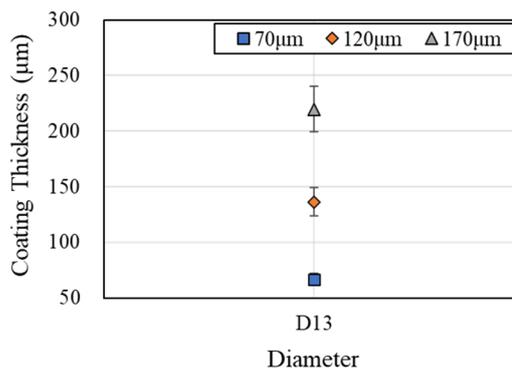


Fig.2 Schematic Diagram of The Specimen

[2023105203]

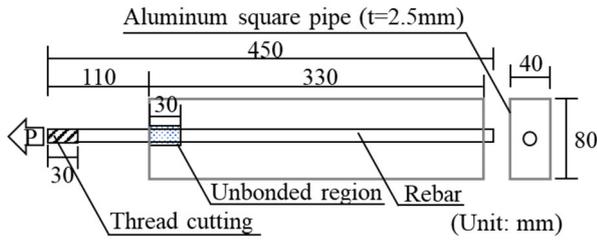


Fig.3 Schematic Diagram of The Specimen

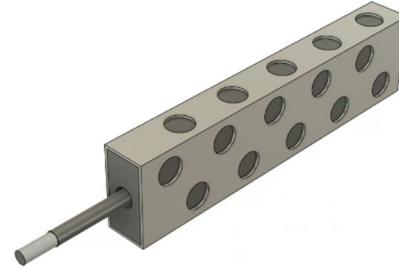


Fig.4 The Specimen with Aluminum Square Pipe

また試験体は、中性子の透過性を高めることを目的として、薄肉断面とした。また、薄肉断面の試験体においては、付着試験において割裂破壊が生じる可能性がある。したがって、コンクリートをアルミ角パイプで外部拘束することで、コンクリートの割裂破壊を防止した。さらに、アルミ角パイプに充填されたコンクリートは、乾燥過程においてアルミ角パイプの外部拘束により水分逸散が遮られる。したがって、型枠とするアルミ角パイプには一定間隔(中心間距離: 60mm)にΦ20mmの穴を開けることで、水分逸散が促進されるよう配慮した(Fig.4)。また、アルミニウムとコンクリートが接触をした場合、コンクリートに水素気泡が生じることが懸念される。したがって、接触面には二液型変性エポキシ樹脂塗料をスプレーで塗布することで、その影響を抑制した<sup>[14],[15]</sup>。また、型枠をアルミ角パイプの外側に設置し、コンクリートの打設後、試験体を直ちに90°方向に倒すことにより、ブリーディングの発生方向およびコンクリートの沈降方向を制御した。

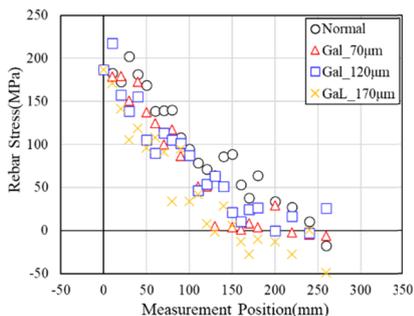
試験体は、コンクリートの打設後 24 時間で脱型し、

Table 1 Concrete Materials

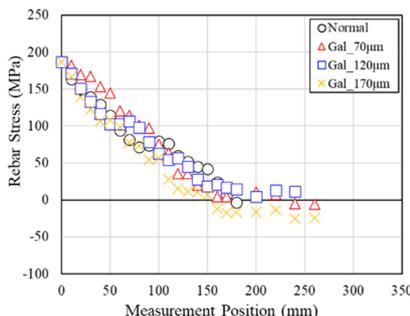
Materials	Types and properties
Water (W)	Deionized water
Cement (C)	Ordinary portland cement Density: 3.16 g/cm <sup>3</sup>
Fine aggregate (S)	Land sand from Oi river Absolute dry density: 2.58 g/cm <sup>3</sup>
Coarse aggregate (G)	Crushed stone from Ome Maximum particle size: 10 mm Absolute dry density: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

Table 3 Concrete Mix Proportions and Properties

W/C (%)	G <sub>max</sub> (cm)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				Ad (g)	Air (%)	SL (cm)	σ <sub>c</sub> (Test day) (MPa)	σ <sub>t</sub> (Test day) (MPa)	E (Test day) (GPa)	σ <sub>c</sub> (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



(a) Measurement Result



(b) Average Value

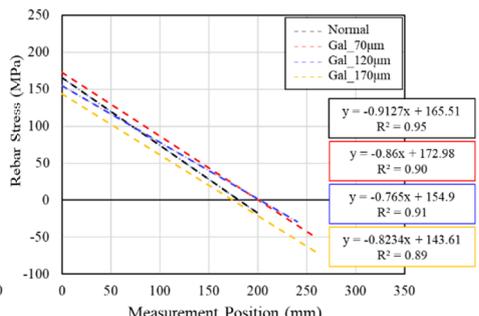


Fig.6 Linear Approximation Calculated by Fig.5

Fig.5 Rebar Stress Distribution

材齢 14 日まで 20°C の水中養生を行った。その後、大型乾燥機により材齢 21 日まで 60°C の機械乾燥を実施することで、中性子の透過性が向上するよう配慮した。乾燥後の試験体は、コンクリート表面からの再吸湿が生じないように、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鉄筋応力測定は、材齢 22 日から 5 日間で実施した。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。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。

#### 2.4 実験結果および考察

RESA により測定されたひずみ分布より算出された鉄筋応力分布(横軸は付着区間のはじまりからの距離、縦軸は鉄筋応力)を Fig.5(a) に示す。また、Fig.5(a) の結果を 3 点移動平均することにより算出した鉄筋応力分布を Fig.5(b) に示す。なお、X=0mm の値は、理論的に 187MPa としてプロットした。さらに、Fig.5(b) の結果を線形近似した鉄筋応力分布を Fig.6 に示す。

溶融亜鉛めっき鉄筋のめっき膜厚が鉄筋応力分布に及ぼす影響に着目を見ると、Fig.5 および Fig.6 より、全体としてめっき膜厚が鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さいことが分かる。ここで、Fig.5 の鉄筋応力分布から算出した付着応力分布を Fig.7、Fig.5 の鉄筋応力分布から算出した付着応力-自由端変位(τ-s) 関係を Fig.8 に示す。Fig.7 および Fig.8 より、測定さ

[2023105203]

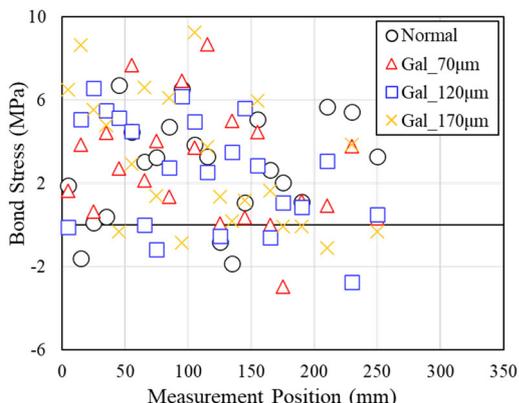


Fig.7 Bond Stress Distribution

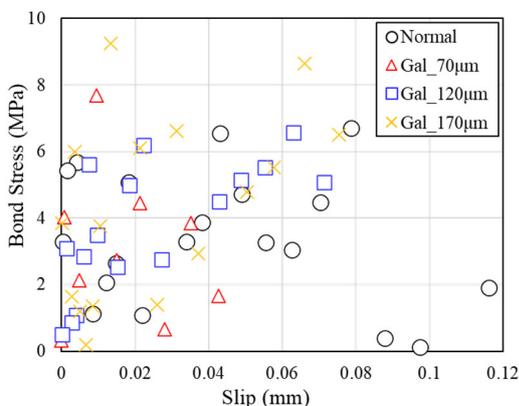


Fig.8 Bond-Slip Relationship

れた鉄筋応力分布における最大付着応力は、いずれの表面形状においても10MPaより小さいことが分かる。したがって、187MPa程度の荷重においては、鉄筋に生じる付着応力が小さく、表面形状に起因する自由端変位量の差異が小さいことから、いずれの水準においても概ね同様の鉄筋応力分布が示されたと推察される。

### 3. 自由な形状の補強材が付着性能に及ぼす影響

#### 3.1 実験水準

実験水準は、3DPにより作製された金属補強材(3DP補強材)の形状とした。

#### 3.2 試験体の概要

コンクリート母材に3DP補強材を配置することで作製した。3DP補強材とコンクリートとの付着区間は140mmである。非付着区間(20mm)は、2.3節と同様の手順により作製した。3DP補強材は、金属系3DPにより作製した。本研究に用いた金属系3DPは、粉末床熔融結合(PBF)方式の3DPであり、レーザービーム(SLM)方式により金属粉末の焼結を行う。本実験で使用する金属粉末は、粒径15-53 $\mu\text{m}$ の球状のマルレージング鋼粉末とした。補強材の長さは190mmであり、端部の35mmは平滑な丸鋼の形状とした。

端部35mmの内20mmには、シャフトとの接合を目的としてM10のねじ切り加工を施した。プリント方向は、3DP補強材の軸方向である。

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、大型乾燥機により材齢21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3DP補強材の応力測定は、材齢22日から4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体である。

#### 3.3 実験結果および考察

結果より、試験体の荷重端付近( $X=0\sim 30\text{mm}$ )および試験体の自由端付近( $X=90\sim 130\text{mm}$ )における、各水準の応力減少勾配はおおむね同程度であるものの、試験体中央付近( $X=30\sim 90\text{mm}$ )においては応力減少勾配に大きな差が見られた。特に、3DP(B)および3DP(W)の応力減少勾配に比べ3DP(T)の応力減少勾配が大きいことから、機械式定着を有する3DP(T)が最も付着性能に優れることが推察される。一方、各水準においても $X=50\text{mm}$ において応力が減少したことについては、補強材そのものの材料特性や金属系3DPの製造方法等を含めて今後の検討課題とする。

### 4. 鉄筋径が回折強度および付着性能に及ぼす影響

#### 4.1 実験水準および試験体概要

実験水準は、D13およびD16の異形鉄筋とした。また、試験体概要は2章と同様とした。

#### 4.2 実験結果および考察

本実験により得られた回折角度および回折強度の関係をFig.9に、本実験により得られた鉄筋応力分布をFig.10に示す。

はじめに、鉄筋径が回折強度に及ぼす影響に着目をする。Fig.9より、D16の回折強度はD13の回折強度と比較して小さい。具体的には、D16の回折強度がD13の回折強度より42%程度低下した。これは、鉄1mmにつき回折強度が30~90程度低下する結果となった。一方、いずれの鉄筋径においてもピーク強度(PI)とバックグラウンド強度(BG)の差(PI-BG)は

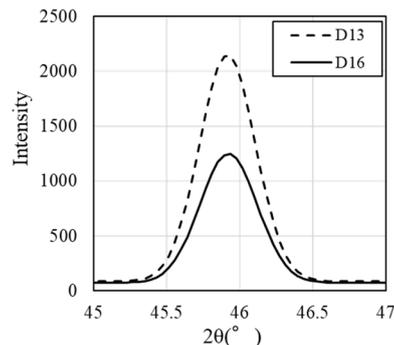


Fig.9 Relation between Diffraction Angle and Intensity

[2023105203]

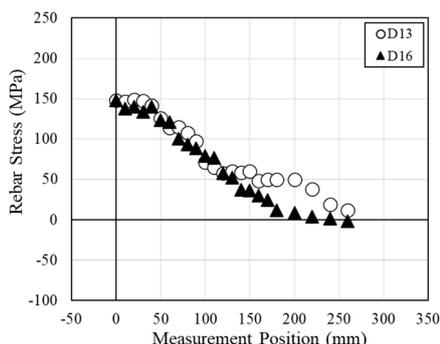


Fig.11 Rebar Stress Distribution

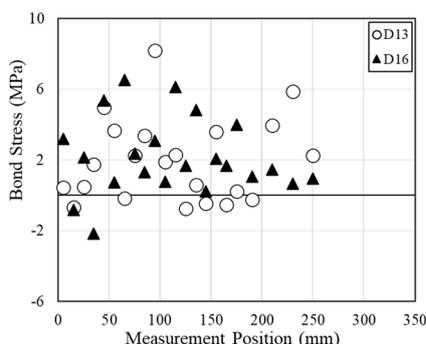


Fig.12 Bond Stress Distribution

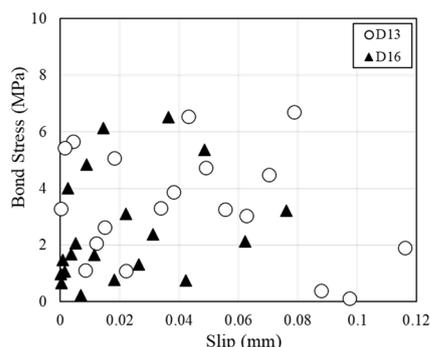


Fig.13 Bond-Slip Relationship

600 を上回っている。ここで、Kobayashi et al.<sup>[16]</sup>は、PI-BG が 600 より大きくなると、結果が安定することを報告している。このことから、本実験の範囲内においては、鉄筋径が測定精度に及ぼす影響は小さいと推察される。

次に、鉄筋径が鉄筋応力分布に及ぼす影響に着目をする。Fig.10 より、D13 および D16 の鉄筋応力分布はおおむね差異が無いことが分かる。ここで、Fig.10 より算出した付着応力分布を Fig.11 に、Fig.10 より算出された  $\tau$ - $s$  関係を Fig.12 に示す。Fig.11 および Fig.12 より、2 章と同様、本実験において測定された鉄筋応力分布における最大付着応力は、いずれの表面形状においても 10MPa より小さい。したがって、鉄筋径によらずおおむね同様の鉄筋応力分布が示されたと推察される。

## 5. まとめ

本研究における所見を以下に示す。

- 1) 溶融亜鉛めっき鉄筋のめっき膜厚が鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さい。
- 2) 機械式定着を有する形状の鉄筋において、付着性能が優れている。
- 3) 鉄筋径が回折強度および鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さい。
- 4) 中性子回折法を用いた付着性能評価において、D10 および D13 に加え D16 の鉄筋についても検討可能である。

## 謝辞

本課題は、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の一環として実施した。

## 参考文献

- [1] 濱田秀則：海洋環境下におけるコンクリート中溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動, Vol.34, pp.209-214, 2014
- [2] 岩崎訓明：亜鉛めっき鉄筋の性能と使用方法, コンクリート工学, Vol.19, No.2, pp.3-11, 1981
- [3] 今野貴史：溶融亜鉛めっき鉄筋の製造技術と機械特性について, 第 34 回防錆防食技術発表大会講演予稿集, Vol.34, 2017
- [4] 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

- [5] 日本建築学会：溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針・同解説, 2022.3
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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), 日本建築学会論文報告集, Vol.131, pp.1-8, 1967.1
- [12] 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシュパ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, 1987.2
- [13] 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
- [14] 水野俊一, 佐野正典：アルミニウム合金とコンクリートとの付着に関する研究, Vol.15, No.8, pp.115-128, 1977.8
- [15] Y. Lin, B. S. Leong, Z.-T. Hu, E.-H. Yang: Autoclaved Aerated Concrete Incorporating Waste Aluminum Dust as Foaming Agent, Construction and Building Materials, Vol.48, pp.140-147, 2017.9
- [16] 小林謙祐, 安江歩夢, 川上真由, KIMJUNHO, 西尾悠平, 宮津裕次, 向井智久, 兼松学：中性子回折法による測定条件がコンクリート内部の鉄筋応力測定精度に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, 材料施工, pp.255-256, 2023.7