

[22045]

応力測定技術に基づくコンクリート用補強材の形状最適化 Shape Optimization of Rebars for Concrete Based on Stress Measurement Technology

川上真由^{#A)}, 安江歩夢^{B)}, 小林謙祐^{A)}, KIM JUNHO^{A)}, 宮津裕次^{A)}, 向井智久^{C)}, 諸岡聡^{D)}, 兼松学^{A)}
Mayu Kawakami^{#A)}, Ayumu Yasue^{B)}, Kensuke Kobayashi^{A)}, Junho Kim^{A)}, Yuji Miyazu^{A)}, Tomohisa Mukai^{C)},
Satoshi Morooka^{D)}, Manabu Kanematsu^{A)}

^{A)} Tokyo University of Science,

^{B)} Shimizu Corporation

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

^{D)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

To clarify the effect of the rebar deformation on the bond performance to concrete, the bond test by neutron diffraction method is conducted for three types deformed rebars with different surface shapes and metal rebar with different shapes. As a result, it was clarified that the effect of surface shape and casting direction on rebar stress distribution is small. Also, it was shown that although bond performance is improved in rebar with mechanical anchoring, commercial deformed bars are superior to metal rebar with different shapes.

Keyword: bond, neutron diffraction method, rebar deformations

1. はじめに

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^{[1]-[5]}。従来の測定方法であるひずみゲージ法^{[6]-[8]}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。

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鉄筋コンクリート(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。

本研究では、補強材の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種類の異形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。

2. 表面形状の異なる異形鉄筋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。

$$2d\sin\theta =$$

$n\lambda$

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

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。

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{2\theta-2\theta_0}{2}$$

$\cot \frac{2\theta_0}{2}$

(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)を乗じることによって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.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、入射スリットによつ

[22045]

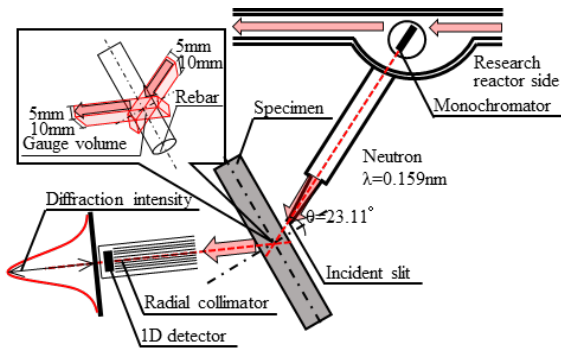


Fig.1 Strain Measurement Outline

Table 1 Experimental Parameters

Parameters	Shapes
Surface deformation of rebar	Bamboo, Screw, Cross (Shown in Fig.2)
Direction of concrete placing	Vertical, Horizontal

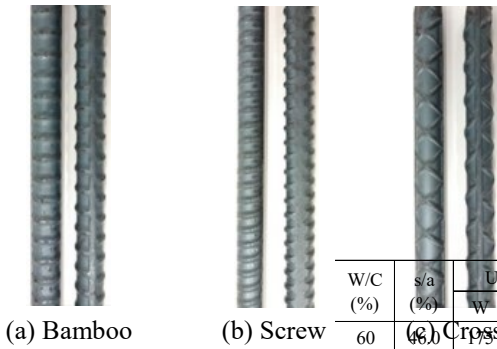


Fig.2 Rebar Deformation

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 2θ 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 ε 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ー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ーの幅は 5mm とした。

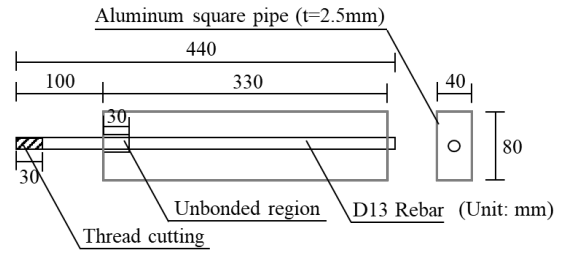


Fig.3 Schematic Diagram of The Specimen

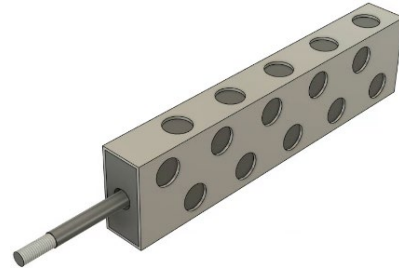


Fig.4 The Specimen with Aluminum Square Pipe

2.1 実験水準

実験水準を Table 1 に示す。実験水準は、3 種類の異形鉄筋の表面形状および打設方向とした。対象と

Table 3 Concrete Mix Proportions and Properties

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Ad (g)	SL (cm)	Air (%)	σ_c (28 day) (MPa)	E (28 day) (GPa)	σ_c (Test day) (MPa)	σ_t (Test day) (MPa)	E (Test day) (GPa)
		W	C	S	G								
60	60	294	808	993	C×1.7%	17.6	4.7	36.6	28.4	35.4	2.62	23.5	

* "Test day" is on the day of the experiment of the neutron diffraction method.

する 3 種類の異形鉄筋を Fig.2 に示す。本実験においては、JIS G 3112 に基づく市販の D13(D : 鉄筋径)異形鉄筋(SD295)を使用した。

2.2 試験体の概要

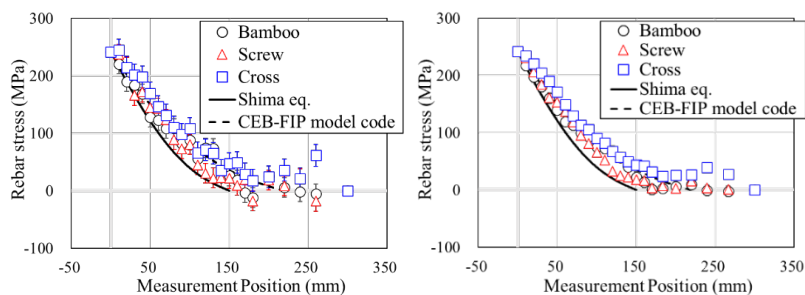
試験体の概要を Fig.3 に示す。試験体は、Fig.3 に示すコンクリート母材に長さ 440mm の異形鉄筋を配置することで作製した。鉄筋とコンクリートの付着区間は 300mm とし、載荷端側には 30mm の非付着区間を設けた。非付着区間は、打設時に設置したゴムホースを脱型時に抜き取ることにより作製した。また試験体は、中性子の透過性を高めることを目的として、薄肉断面とした。また、薄肉断面の試験体においては、付着試験において割裂破壊が生じる可能性がある。したがって、コンクリートをアルミ角

Table 2 Concrete Materials

	Types・Remarks
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 : 2.59 g/cm ³
Coarse aggregate (G)	Crushed stone from Oume Maximum particle size : 10 mm Absolute dry density : 2.66 g/cm ³
Chemical admixture (Ad)	Standard type

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

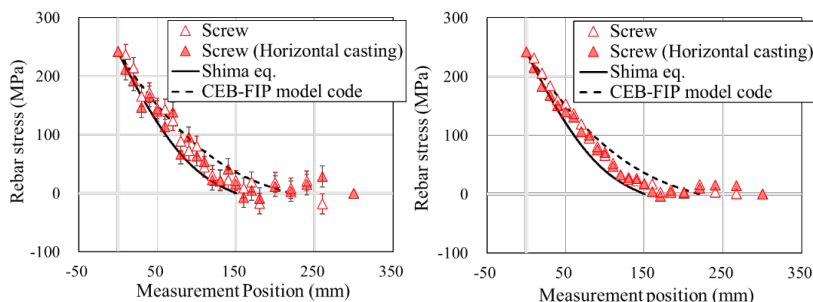
[22045]



(a) Measurement Result

(b) Average Value

Fig.5 The Influence of Deformation



(a) Measurement Result

(b) Average Value

Fig.6 The Influence of Casting Direction

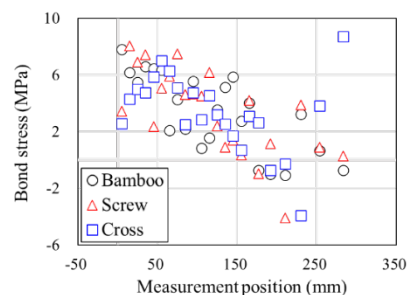


Fig.7 Bond Stress Distribution
Calculated by Fig.4

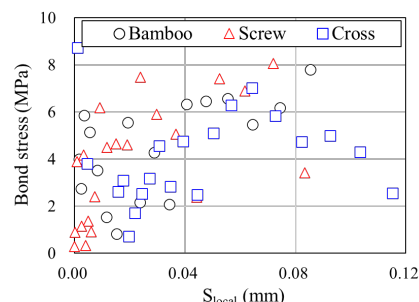


Fig.8 Bond-Slip Relationship
Calculated by Fig.4

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 $\Phi 25\text{mm}$ 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^{[9],[10]}。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、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 時間の気中養生を行い、大型乾燥機により材齢 28 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 29 日から 4 日間で実施した。コンクリートの使用材料および調査を、Table 2 および Table 3 に示す。ここで、試験日(材齢 29 日)の強度値は前述した養生条件における値である。

2.3 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した鉄筋応力分布(縦軸は鉄筋応力、横軸は付着区間のはじまりからの距離)を Fig.5(a) および Fig.6(a) に示す。また、Fig.5(a) および Fig.6(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) および Fig.6(b) に示す。ここで、Fig.5 においては異形

鉄筋の表面形状による影響、Fig.6 においては打設方向による影響を示している。なお、 $X=0\text{mm}$ および $X=300\text{mm}$ の値は、それぞれ理論的に 242MPa および 0MPa としてプロットした。さらに、図中には島ら^[7]の τ - s 関係および CEB-FIP model code^[11]の τ - s 関係を逐次積分することで算出した、鉄筋応力分布を示す。なお、鉄筋応力分布の算出に際しては、積分区間(微小区間)を 0.01mm 、初期微小すべり量を 0.002mm として設定した。

はじめに、鉄筋の表面形状が付着応力分布に及ぼす影響に着目をする。Fig.5 より、クロス節においてはその他の表面形状と比較して、応力減少勾配が緩やかな傾向にあるものの、全体として鉄筋の表面形状が鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さい。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、 250MPa 程度の载荷においては、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、いずれの表面形状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。

つぎに、打設方向が鉄筋応力分布に及ぼす影響に着目をする。Fig.6 より、打設方向が鉄筋応力分布に及ぼす影響は、表面形状が及ぼす影響と同様に小さいことが分かる。これには、本実験に用いた試験体における鉄筋下面の高さが小さいことが影響を及ぼしたと推察される。これまで、打設方向および鉄筋下面の高さが付着挙動に及ぼす影響は古くから報告

[22045]

されており、部材上部に位置する鉄筋および水平方向打設の鉄筋の付着応力は、下部に位置する鉄筋および垂直方向打設の鉄筋の付着応力と比較して大きくなることが明らかにされている^{[12],[13]}。また、これらの付着応力には、ブリーディングおよびコンクリートの沈降により生じる、鉄筋とコンクリート界面の脆弱層および空隙の形成が影響を及ぼすことが明らかにされている^{[14],[15]}。ここで、指針類に着目すると、ACI(American Concrete Institute) 318 "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary"では、水平鉄筋の下面に 305mm 以上の高さがある場合において、付着劣化が生じることを定義している。RC 規準においても、付着劣化が生じる上端筋に関して「曲げ部材にあってその鉄筋の下に 300mm 以上のコンクリートが打ち込まれている場合」と定義している^[16]。本実験で使用した試験体をこれらの指針類の値と比較すると、本実験における鉄筋下面のコンクリートは 31mm 程度であり、上記の値の 1/10 程度と極めて小さい。したがって、本実験の試験体においては鉄筋下面の高さが小さく、ブリーディングや沈降に伴う付着応力の低下が生じなかったことから、鉄筋応力分布に明確な差異が生じなかったと推察される。

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、2.2 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、粒形 15-53 μ m の球状のマルエ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、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。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 28 日から 4 日間で行った。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 3DP 補強材における測定応力の定量性

既往の研究においては、鉄筋を対象とした実験において、付着挙動評価における中性子回折法の適用性が報告されている。一方で、本実験に使用する 3DP 補強材はマルエージング鋼を素材としている(3.2 節)ことに加え、製造方法も異なることから鉄筋と同様の応力評価が可能であるかは不明瞭である。したがって、本節では中性子回折法による 3DP 補強材の応力測定を実施する前段階として、3DP 補強材を対象に応力測定の定量性に関する検討を行った。

結果より、同じ PI-BG における標準偏差は、鉄筋と比較して 3DP 補強材の方がやや大きい。一方で、PI-BG の増加に伴う標準偏差の減少傾向は、鉄筋および 3DP 補強材において概ね同様の傾向にある。この PI-BG が 600 以上は測定対象が鉄筋の場合の値であることから、3DP 補強材において同様の値が適用可能かは不明である。そのため、3DP 補強材の定量性の確保においては、別途詳細な検討が必要となるものの、本分析における 3DP 補強材の最終的な測定時間の PI-BG は 1000 以上と極めて大きい。

結果より、本実験に使用した 3DP 補強材の回折強度は、市販の鉄筋の 1/4 程度である。これには、補強材の作製方法に起因する回折面の配向、および材料に起因する微視構造(マルテンサイト、フェライト等)が影響を及ぼしたと推察される。

以上より、3DP 補強材における PI-BG と標準偏差の関係は、市販の鉄筋と同様の傾向を示すものの、3DP 補強材は鉄筋と比較して回折強度が小さいことが明らかとなった。したがって、3DP 補強材を対象に信頼性の高い応力測定を実施する上では、十分な測定時間を確保することが必要となる。なお、本実験では本検討の結果を踏まえた上で、1 点あたりの測定時間を鉄筋の 1.5 倍として設定した。

3.4 実験結果および考察

結果より、3DP 補強材の S_f は鉄筋と比較して小さくなった。ここで、3DP(B)のヤング係数は $Reb(B)$ と比較して小さい。したがって、3DP(B)の S_f は $Reb(B)$ と比較して大きくなることが予測されるものの、本実験の 3DP(B)の S_f は $Reb(B)$ と比較して小さい値を示した。また、3DP(T)の応力減少勾配においては、機械式定着部分において急激な応力減少が確認された。一方で、この断面積の比率のみでは、試験体内における荷重の保存が成り立たなくなることから、機械式定着部分における応力の減少については、回折部分における局所応力の影響も含め詳細な検討が必要となる。なお、3DP(T)の応力減少勾配は、機械式定着部分を除き 3DP(W)と同程度である。さらに、3DP(W)は付着区間全体において緩やかな応力減少勾配を示した。

以上より、機械式定着は補強材のすべり挙動を抑制すること、および市販の異形鉄筋は本章で検討された自由な形状の補強材と比較して優れた形状を有していることが明らかとなった。

[22045]

4. まとめ

本研究における所見を以下に示す。

- 1) 異形鉄筋の表面形状が鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さい。
- 2) 打設方向が鉄筋応力分布に及ぼす影響は小さい。
- 3) 機械式定着は補強材のすべり挙動を抑制すること、および波打ち形状の補強材の応力分布はその他の形状と比較して緩やかな傾向にある。
- 4) 付着性能の観点から、市販の異形鉄筋は本研究において検討された自由な形状の補強材と比較して優れた形状を有する。

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] 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
- [2] 楠浩一, 椛山健二, 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
- [3] 鈴木裕士, 楠浩一, 佐竹高祐, 兼松学, 小山拓, 丹羽章暢, 椛山健二, 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
- [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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブ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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] fib: fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2010
- [12] A. P. Clark: Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars, ACI Journal, Vol.43, No.4, pp.381-400, 1946.12
- [13] L. Chen, R. K. L. Su: Influence of Rebar Geometry on the Steel-Concrete Interface of Reinforced Concrete, Construction and Building Materials, Vol.304, 124668, 2021.10
- [14] A. T. Horne, I. G. Richardson, R. M. D. Brydson: Quantitative Analysis of the Microstructure of Interfaces in Steel Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1613-1623, 2007.12
- [15] F. Chen, C. Q. Li, H. Baji, B. Ma: Effect of Design Parameters on Microstructure of Steel-Concrete Interface in Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.119, pp.1-10, 2019.5
- [16] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018