# 論文 中性子回折法を用いた鉄筋の付着応力度分布に関する研究

楠 浩一\*1・椛山 健二\*2・向井 智久\*3・鈴木 裕士\*4

**要旨**:これまでの鉄筋の付着抵抗機構に関する研究では、離散的に貼付されたひずみゲージにより、鉄筋のひずみを計測し、ひずみから鉄筋の応力を推測する方法が取られていた。ひずみゲージを表面に貼付すると、鉄筋の付着性能自体に大きな影響を与えてしまうことが考えられる。一方、放射線の一つである中性子は、材料に照射しその回折角を計測することにより、材料の弾性ひずみ量が非接触で計測できることが知られている。そこで本研究では、従来のように鉄筋にひずみゲージを離散的に貼付して行った実験結果と、残留応力解折用中性子回折装置を用いた計測結果による付着応力度分布の比較を行い、その差異を検討した。

キーワード:付着応力度,中性子回折法,非接触,引き抜き試験

#### 1. はじめに

これまでの鉄筋の付着抵抗機構に関する研究では、離 散的に貼付されたひずみゲージにより, 鉄筋のひずみを 計測し, ひずみから鉄筋の応力を推測する方法が取られ ていた。その為従来の方法では、鉄筋の数点に貼付した ひずみゲージから、鉄筋のひずみが離散的に分かるだけ であり、ゲージ間の鉄筋のまわりの応力状態は、推定す るしかなかった。また、ひずみゲージを表面に貼付する と, 鉄筋の付着性能自体に大きな影響を与えてしまう。 一方,中性子回折法は,中性子線の優れた透過能を生 かすことで、数 mm から数 cm オーダーの物質内部の応 力状態を非破壊・非接触で測定することができる唯一の 手段である。日本国内には、日本原子力研究開発機構の 研究用原子炉 JRR-3 に応力測定専用装置 RESA (写真-1) および RESA-II が設置されており、様々な産業利用 や学術研究が行われている。特に、ひずみゲージ法や X 線回折法では測定が困難な複雑形状の機械部品(例えば, 自動車エンジン) や溶接構造物の残留応力測定に用いら れてきたが、コンクリート構造の応力測定については、

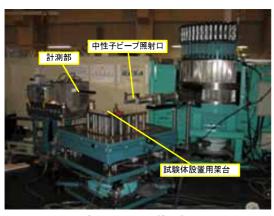


写真-1 RESA 装置概要

一般的にコンクリートが中性子を遮蔽すると考えられてきたため、中性子回折法が適用された例は世界的にも皆無である。そこで本研究では、RESAを用いてコンクリートに埋設された鉄筋の引張応力を直接計測し、鉄筋の付着抵抗機構を検討することを目的とする。本研究はその第一段階として、付着破壊が生じない状態、つまり鉄筋がコンクリート外で引張降伏する状態を対象とし、従来のように鉄筋にひずみゲージを離散的に貼付して行った実験結果と、RESAを用いた計測結果による付着応力度分布の比較を行う。

# 2. 中性子応力測定の概要 1)

# 2.1 中性子ひずみ測定原理

結晶粒内には、原子が規則正しく整列しており、これら原子は、多数の平行な面に属していると考えることができる。これを格子面(回折面)と呼び、この格子面が多数重なった構造を結晶という。中性子線は個々の原子に当たるとあらゆる方向に散乱されるが、式(1)に示すブラッグの回折条件式を満足する場合に、それらの散乱X線が同位相になって相互に干渉し回折現象を生じる。

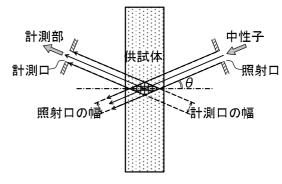


図-1 計測方法の概要

- \*1 横浜国立大学大学院 工学研究院 准教授 博(工) (正会員)
- \*2 芝浦工業大学 工学部 准教授 博(工) (正会員)
- \*3 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員 博(工) (正会員)
- \*4 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 量子応用研究部門 中性子残留応力解折研究グループ 博(工) (非会員)

$$2d\sin\theta = n\lambda\tag{1}$$

ここで、n を回折次数、d を格子面間隔、 $\lambda$  を入射 X 線の波長とする。また、 $\theta$  はブラッグ角と呼ばれ、ブラッグ角を 2 倍した  $2\theta$  を回折角と称する。

例えば、材料に引張負荷が加わると、格子面間隔 d は 引張軸に沿って  $\triangle d$  だけ大きくなる。この d の変化は、式 1 を  $\theta$  で微分することにより、ブラッグ角の変化に置き換えることが可能であり、その関係は下記の式(2)で表される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\frac{2\theta - 2\theta_0}{2} \frac{1}{\tan(2\theta_0/2)} \tag{2}$$

すなわち、回折角  $2\theta$  の変化を測定することで格子ひず みを評価することが可能となる。

#### 2.2 RESA による計測

RESA は、実験用原子炉から取り出した中性子を、供 試体に照射し, その回折線を計測部で計測するものであ る。計測は、図-1に示すように、あらかじめ決めた照 射口の幅で中性子を試験体に $\theta$ の角度であてる。この中 性子の一部が, 供試体が持つ結晶のある回折面で回折し, 計測部に到達する。到達する中性子の回折角は, 供試体 が持つ結晶の格子面間隔の変化に応じて、若干変化する。 計測部に到達した中性子の, 回折角ごとの個数を一定時 間計測すると、図-2に示すような回折プロファイルが 得られる。この回折プロファイルは,一般にガウス分布 と一致することから, ガウスフィットにより得られた回 折角  $2\theta$  を式 2 に代入することで、格子ひずみを得るこ とができる。なお、ここで得られる格子ひずみは弾性ひ ずみを示している。つまり、図-3に示すように、非線 形領域である B 点においても, 回折角から算出されるひ ずみは弾性ひずみ分のみであり  $\epsilon_e$ となる。その為、計測 された B 点のひずみ  $\epsilon_B$  と除荷後のひずみ  $\epsilon_C$  の差  $\epsilon_e$ にヤング係数を乗じることにより, 応力を算出すること が出来る。なお、ここで言うヤング係数とは、回折面ご とに異なる回折ヤング係数であり、機械的なヤング係数 とは異なる。

# 3. 試験体と加力・計測計画

#### 3.1 試験体概要

試験体および加力冶具を図-5に示す。試験体部分は、直径50mm,長さ400mmの円筒形で、中央にD10の異形鉄筋が埋設されている。区間(1)は定着を除去したひずみ一定区間である。鉄筋の定着部分は、図中区間(2)と示した部分で、300mmの定着長を有する。3.2で詳細は述べるが、鉄筋が引抜ける前にコンクリート外の部分で鉄筋が引張降伏するよう、定着長さを決定した。鉄筋は、ロードセルを介して反力用の耐圧版に固定するため、

D13 のねじ節鉄筋を D10 に溶接している。

試験体は3体とし,1体は区間(2)に50mm間隔で一対のひずみゲージを鉄筋表面に貼付し,比較用として事前に加力した。

## 3.2 使用材料と定着長さの決定

本実験では、鉄筋の付着破壊を防止し、定着部外で鉄筋が引張降伏するよう設計した。その為、文献 2)~5)を参考に、短期許容応力度および終局付着割裂強度の検討を行い、定着長さを決定した。使用した材料は、鉄筋は SD295(降伏応力度  $\sigma_y$ =295N/mm²,上限強度  $\sigma_u$ =369N/mm²)を用いた。D10 の断面積は A=71mm²,周長は $\sigma_u$ =20.9kN,上限強度は  $\sigma_u$ =20.9kN,上限強度は  $\sigma_u$ =20.9kN,上限強度は  $\sigma_u$ =26.2kN となる。コンクリートは、10mm の砕石を粗骨材として用い、設計基準強度は、 $\sigma_u$ =26.2kN となる。

主筋を上端筋と見なした場合の短期許容付着応力度 fa

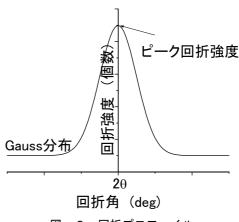


図-2 回折プロファイル

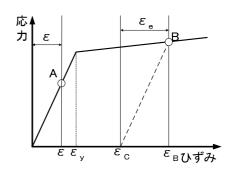


図-3 材料の非線形性と計測されるひずみ

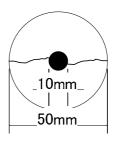


図-4 想定するサイドスプリット破壊(部材断面図)

は、文献 2)によると 2.79N/mm², 文献 3)によると 1.44N/mm² となった。これらの許容付着応力度を用いて 必要定着長さを検討した結果、文献 2)では $\ell \geq 250$ mm, 文献 3)では $\ell_{db} \geq 220$ mm と算出された。また、終局付着 割裂強度の算定では、図-4に示すサイドスプリット破壊を想定し、横補強筋は存在しないためその影響を無視して文献 4)および文献 5)の方法を用いて算出した。その 結果、付着割裂強度  $\tau_{bu}$  は、3.08N/mm² と算出された。 鉄筋の上限強度を考慮して、平均付着応力度から算出した定着長さは、 $\ell \geq 284$ mm となった。以上の結果から、定着長は 300mm とした。

なお、事前に実施した材料試験の結果、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  は 3 本の平均で 45.9N/mm<sup>2</sup> であった。また、引張強度は 3 本の平均で 2.26 N/mm<sup>2</sup> であった。

## 3.3 加力方法

加力は引抜一方向とし荷重制御で行った。加力には、 図-5に示すセンターホールジャッキを用いた。本加力 方法は自己完結型であり、外部に反力は必要ない。

RESA での計測に先立ち、同様の試験体を、図-5と同じ加力装置を用いて、試験室で単調引張加力を実施し、試験体の性状をあらかじめ確認した。また、RESAでは、30N/mm²、100N/mm²、150N/mm²、200N/mm²、250N/mm²の5種類の応力をセンターホールジャッキで導入し計測を行った。計測は、まず応力を250N/mm²として行った。その後、50N/mm² ずつ応力を漸減させて計測した。計測場所に長時間滞在することが難しいため、応力導入後は、荷重をキープする等の処置をしていない。

#### 3.4 計測方法

鉄筋の引張力は、ロードセルにより、データロガーを 介して計測した。鉄筋のひずみはひずみゲージを D10 鉄 筋の付着のないひずみ一定域で両面に貼付し、データロ ガーを介して計測した。ロードセルのストロークの伸び と鉄筋の抜出し量は、変位計を用いて計測した。

鉄筋の弾性ひずみは、 RESA を用いて計測した 1)。中 性子回折法により、鉄筋軸方向の αFe(110)の格子ひずみ変 化を測定した。中性子線の波長は約0.16nmであり、このとき の回折角20は約46°である。中性子線の経路は図-6に示 すようになる。本測定では、図-6に示すように、おお よそ "鉄筋の断面積×5 mm (長さ方向)" の体積内の平 均的なひずみを測定しているため、測定位置によっては、 引張負荷中に応力特異場を生じる可能性のある節部分 も含めた平均ひずみを測定することになる。図-5に示 した区間(1)および区間(2)において、図-7に示したよう に合計 15 点で計測した。中性子による 1 点の計測は、8 分としたため、コンクリートのクリープ等の影響を考慮 して, 中性子を用いた計測時には, 負担応力および鉄筋 ひずみの計測を実行した。制御に用いるロードセルの定 格出力は 3000 μ のため, 規格上は 0.1kN 刻みの計測が可 能である。各計測点では、回折プロファイルの精度を向上さ せるため, 各応力度別(30N/mm<sup>2</sup>, 100N/mm<sup>2</sup>, 150N/mm<sup>2</sup>, 200N/mm<sup>2</sup>, 250N/mm<sup>2</sup>) に, 5回, 3回, 3回, 4回, 3回(各回 8分)の繰り返し計測を行い、それぞれの応力度に対して、 得られた複数の  $2\theta$  の平均値を各応力度での  $2\theta$  とした。

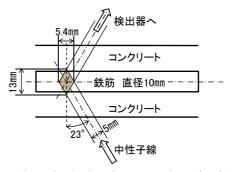
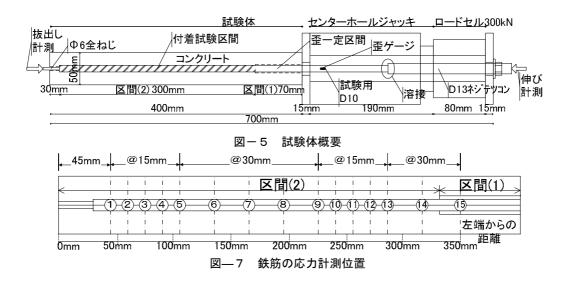


図-6 中性子線の経路(塗りつぶし部分が測定領域)



# 4. 実験結果とその考察

#### 4.1 事前加力試験結果

RESA での計測に先立ち、試験体の強度を確認するた めの加力を実施した。実験には、RESA で計測予定試験 体(以下,試験体1)と同一のもの,および定着部分に 鉄筋にひずみゲージを添付したもの(以下,試験体 2) の2体である。両試験体とも、鉄筋の引張降伏後もコン クリート部分に損傷は生じなかった。

両試験体の応力度-ひずみ関係の一部を図-8に示 す。ここで、応力度は、図-5に示したロードセルで計 測された導入引張力を, D10 の公称断面積 71mm<sup>2</sup>で除し た値である。同じくひずみとは、図-5に示したコンク リート外のひずみゲージの値である。降伏時応力を、ひ ずみが急激に増加する前の点での応力と定義すると,試 験体 1 では 348.8N/mm<sup>2</sup>, 試験体 2 では 351.4N/mm<sup>2</sup> と, 両者はほぼ一致した。両試験体ともヤング係数もほぼ一 致しており、試験体 1 が 1.76×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>、試験体 2 が  $1.75 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ となった。両試験体の最大応力度および ヤング係数がほぼ一致したことから, 両試験体とも定着 強度が十分であり、D10の鉄筋が引張降伏したと考えら れる。

図-9に、試験体2における定着部分のひずみ計測値 を示す。ひずみは、図-5中区間(2)の部分(定着部分) で、付着の起点から 25mm 入った箇所を最初に、50mm 刻みで貼付したひずみゲージによる。図では,最大応力 時(350N/mm<sup>2</sup>), およそ短期許容応力度時(295N/mm<sup>2</sup>, 計測値は 299N/mm<sup>2</sup>), およびおよそ長期許容応力度時 (197N/mm<sup>2</sup>, 計測値は 205N/mm<sup>2</sup>) で計測されたひずみ を示している。長期許容応力度時では, 定着として有効 に作用している長さは、およそ 225mm であることが分 かる。一方, 短期許容応力度時で, 左端から 50mm 付近 にもひずみが発生し始め、最大応力時では 50mm の点で

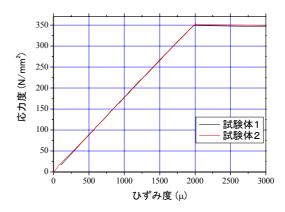


図-8 事前実験結果の応力度-ひずみ関係

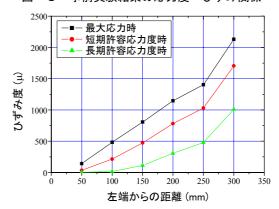


図-9 鉄筋のひずみ分布(ひずみゲージ付試験体)

141 μ のひずみが発生した。

## 4.2 RESA による計測結果

加力は、先ずはクリープの影響を確認するために  $200N/mm^2$ の試し加力を行った。その後、 $300N/mm^2$ まで 加力し、計測を行った。その後、応力を漸減して計測し た。図-10にロードセルの計測荷重から計算した鉄筋の 応力度の時刻歴を、図-11には鉄筋の定着外部分のひず みの時刻歴を示す。300N/mm²まで加力した後の計測で は, 8 時間ほどかけて 250N/mm<sup>2</sup> まで応力度が低下して

表-1 応力度レベル毎の各計測位置における2 $ heta$ [deg]								
計測位置	左端からの			平均値	標準偏差			
	距離 (mm)	30 N/mm <sup>2</sup>	100 N/mm <sup>2</sup>	150 N/mm <sup>2</sup>	200 N/mm <sup>2</sup>	250 N/mm <sup>2</sup>		
1	45	46.087	46.093	46.097	46.081	46.095	46.091	0.0066
2	60	46.071	46.089	46.083	46.076	46.084	46.080	0.0069
3	75	46.087	46.086	46.080	46.080	46.071	46.081	0.0066
4	90	46.084	46.088	46.094	46.088	46.083	46.087	0.0045
5	105	46.090	46.064	46.095	46.076	46.086	46.082	0.0122
6	135	46.094	46.109	46.112	46.106	46.103	46.105	0.0069
7	165	46.078	46.086	46.084	46.077	46.081	46.081	0.0036
8	195	46.075	46.102	46.078	46.086	46.089	46.086	0.0105
9	225	46.103	46.109	46.105	46.114	46.096	46.105	0.0067
10	240	46.104	46.085	46.089	46.091	46.095	46.093	0.0073
(1)	255	46.058	46.056	46.051	46.070	46.051	46.057	0.0078
12	270	46.078	46.089	46.095	46.093	46.078	46.086	0.0083
13	285	46.088	46.079	46.080	46.069	46.071	46.078	0.0077
(14)	315	46.077	46.074	46.059	46.065	46.061	46.067	0.0078
15	350	46.071	46.065	46.061	46.042	46.046	46.057	0.0126

いることが分かる。この計測部分を  $250N/mm^2$  の計測部分と見なした。鉄筋のひずみは最大でも  $2000 \, \mu$  以下であり、鉄筋は降伏していないが、 $\mathbf{Z}-\mathbf{8}$  に示した鉄筋の応力度一ひずみ関係からも分かるとおり、鉄筋は降伏するほぼ手前まで加力されたことが推察される。

実験では、図-12 中  $F_0$ <sup>6</sup>に示すような、回折プロファイルが計測される。この解析プロファイルから、回折ピーク強度時の回折角  $2\theta$  をガウスフィッティングにより 算出する。得られた  $2\theta$  と式 1 から、鉄筋の弾性ひずみ

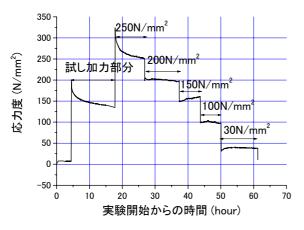


図-10 導入応力度の推移

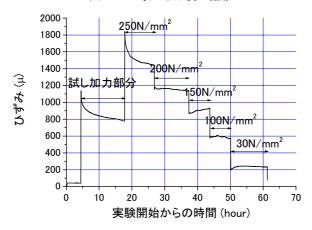


図-11 ひずみゲージによる鉄筋ひずみの推移

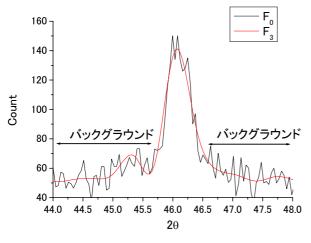


図-12 計測結果の一例

分が計算される。しかし、試験体のコンクリート部分による散乱・吸収の影響が大きいために、図-12 中  $F_0$ <sup>®</sup>に示すように水素原子による非干渉性散乱に起因するバックグラウンド(図-12 参照)が高いうえに回折ピーク強度も弱い。また、回折プロファイルにノイズの影響が重なるために、ピークフィッティング精度が低下する。そこで、Wavelet 変換を用いて、短周期ノイズ成分を除去した(図中  $F_3$ <sup>®</sup>)。この  $F_3$ <sup>®</sup>に対して、ガウスフィッティングを行い、ピークの  $2\theta$  を算出した。

各応力度で得られた  $2\theta$  を表 -1 と図 -13 に示す。また,式 2 を用いて求めた弾性ひずみ  $\epsilon$  に,回折ヤング係数  $(=2.24\times10^5)$  をかけて算出した応力を図 -14 に示す。ここで  $2\theta_0$  は,30N/mm² での計測された回折角を用いた。図 -13 では,左端からの距離が 135 mm,225 mmの位置ではいずれの負荷においても回折角が大きくなる傾向が見られ,255 mmの位置では小さくなる傾向が見られ。の -14 では,節近傍に発生する応力特異場の影響を受けて,回折角が変化したと考えられる。一方,図 -14 では,RESA の応力分解能  $\pm 30$  N/mm² 以上のばらつきが見られるが,そのばらつきの傾向も負荷によらず

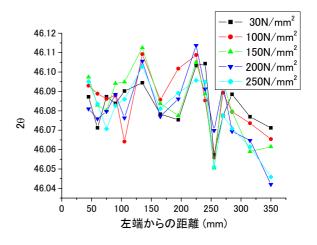


図-13 計測された回折角  $2\theta$  [deg] 150 100 50 応力度 (N/mm²) 0 -50 100N/mm<sup>2</sup> 150N/mm<sup>2</sup> -100 200N/mm<sup>2</sup> 250N/mm<sup>2</sup> -150 150 200 左端からの距離 (mm)

図-14 算出した応力度

ほぼ一定であることから、図-13 に示した結果と同様に、 鉄筋の節近傍の応力特異場がばらつきの原因と考えら れる。

#### 4.3 実験結果の考察

図-13 および図-14 に示すように、回折角分布や算 出された応力度分布からは、応力特異場によるばらつき の影響が大きく,付着領域を示す有意な情報を見出しに くい。そこで、表-1に示すように、導入力の大きさに よらず各点で計測された全ての回折角 2θの平均値と標 準偏差を求めた。各計測点での回折角 2θの平均値を図 -15 に示す。図中には、標準偏差をエラーバーで示して いる。平均回折角は、鉄筋の節近傍における応力特異場 の影響による回折角の変化(ばらつき)は認められるが、 それらを除けば、左端から 270 mmまではほぼ一定値を示 している。一方、左端から270 mm以上では、応力特異場 に見られるような急激な回折角変化ではなく, 比例的に 減少する変化が見られる。左端から 270 ㎜までの平均回 折角 46.086° を無応力状態の回折角として、左端から 350 ㎜の位置における応力度を計算すれば引張の 134N/mm<sup>2</sup>と計算され, 30N/mm<sup>2</sup>から 250N/mm<sup>2</sup>の 5 段階 全ての平均応力度レベル 146N/mm<sup>2</sup> に近い値を得た。以 上から、鉄筋に負荷される応力は、およそ定着長さ60 mmの範囲のみで負担したと考えられる。よって 250N/mm<sup>2</sup>の応力を作用させた時の平均付着応力度は,

$$\tau = \frac{250 \, N/mm^2 \times 71mm^2}{30mm \times 60mm} = 9.9 \, N/mm^2 \tag{3}$$

となる。一方、図-9に事前加力で計測されたひずみ分布を示している。ひずみゲージのリード線は、主筋に沿って、試験体のセンターホールジャッキと逆端から取り出した。図-9から、ひずみゲージで計測した場合、図-15の傾向と異なって、より長い範囲の鉄筋が引張り応力を負担していることが分かる。これは、リード線による鉄筋の付着低下の影響と考えられる。

#### 5. 終わりに

本実験結果から、ひずみゲージを貼付した試験体と、貼付しない試験体では、コンクリート内の付着応力分布が異なる可能性が高いことが分かった。しかし、RESAによる計測により、コンクリート内の鉄筋の付着応力分布の傾向は把握できたものの、中性子回折法では、ある体積中の平均応力状態を評価しているために、鉄筋の節部分に発生する応力特異場の影響を受ける場合もあり、ばらつきの大きい結果となった。測定領域を小さくすることで、応力特異場の影響を低減させることも可能であるが、コンクリート中の自由水が多い場合、それが遮蔽

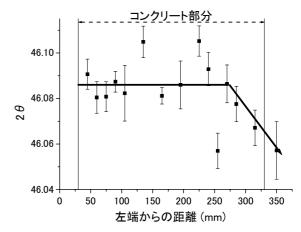


図-15 各点での $2\theta$ の平均値と標準偏差 [deg]

材となって十分な強度の回折線が得られない可能性が ある。したがって、今後は、コンクリート内の水素元素 を出来るだけ減らすことで、局所領域の応力測定を実現 し、精度の高い応力評価を行う予定である。

#### 謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構の平成 19 年度(下期)施設共用利用課題(課題番号 2007B-A12)として実施された。課題申請から実施に関しては、同機構の秋庭 義明 客員研究員(名古屋大学准教授)、郷 信広特別研究員にお世話になりました。ここにお礼申し上げます。また、実験の計画・実施は、同課題の研究代表者である勅使川原正臣 名古屋大学教授のもと、著者らの他に田才 晃 横浜国立大学教授、真田靖士 豊橋技術科学大学准教授、丸山一平 名古屋大学准教授、畠中雄一横浜国立大学 技術職員のメンバーで実施された。

## 参考文献

- 鈴木裕士, 菖蒲敬久:中性子および放射光による残留応力測定とその相補利用, ふぇらむ, Vol. 11, No. 11, pp.9-16, 2006
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造計算規準・同解 説,1991
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造計算規準・同解 説 1999, 1999
- 4) 藤井栄,森田司郎:異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第一報,日本建築学会論文報告集,第 319 号,pp.47-54,1982.9
- 5) 藤井栄,森田司郎:異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第二報,日本建築学会論文報告集,第 324号,pp.45-52,1983.2
- 6) 榊原進:ウェーブレットビギナーズガイド,東京電機大学出版,2003