

曲げ付着加力による鉄筋のコンクリート内付着応力度分布に関する研究  
Study on the mechanical characteristics of reinforced concrete  
structure with neutron diffraction technique

田才晃<sup>1)</sup>、栴山健二<sup>2)</sup>、楠浩一<sup>1)</sup>、

Akira TASAI, Kenji KABAYAMA, Koichi KUSUNOKI,

向井智久<sup>3)</sup>、畠中雄一<sup>1)</sup>、鈴木 裕士<sup>4)</sup>

Tomohisa Mukai, Yuichi HATANAKA, and Hiroshi SUZUKI

<sup>1)</sup>横浜国立大学   <sup>2)</sup>芝浦工業大学   <sup>3)</sup>建築研究所   <sup>4)</sup>原子力機構

(概要)

鉄筋に一定に作用した引張力がコンクリート中に伝達する「付着応力」の分布を計測した。実際の梁に作用している応力状態を模擬するため、曲げモーメントとせん断力が同時に作用する、曲げ付着試験とした。計測時にばねを用いることで、一定応力を長期間保持して加力することが可能であった。また、鉄筋の付着特性は非線形性が強く、一度大きな引張力を受けて除荷すると、端部の付着力が0となることが分かった。これは、コンクリートの非線形性に大きく依存していると考えられる。

キーワード : RESA、鉄筋コンクリート、付着応力

(1行あける)

1. 目的

鉄筋コンクリートは、鉄筋とコンクリートによって構成される。鉄筋は圧縮力に対しては容易に座屈するが、引張力に対しては塑性域を含めて十分な延性を有している。一方、コンクリートは、引張力に対しては耐力が非常に低く、早期にひび割れるが、圧縮力に対しては、高い強度を有している。鉄筋コンクリート構造の性能は、この相補完しあう材料によって達成される。引張力に対して、鉄筋の引張応力は鉄筋とコンクリートの付着抵抗機構（接触面での応力伝達機構）によって、コンクリートに伝達される。この付着抵抗機構が十分でない、鉄筋はコンクリートから引抜ける。つまり、付着抵抗機構は、鉄筋コンクリート構造の要である。

これまでの鉄筋の付着抵抗機構に関する研究では、非常に粗いピッチで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、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、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。国内では独立行政法人 原子力研究機構の中性子応力測定装置 RESA-1、RESA-2、および JPARC のみが可能である。そこで本研究では、RESA-1 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。本研究はこれまで、シリンダー型の試験体を用いて実験を行ってきた。その結果、試験体を絶乾状態にすることにより、有効に中性子が透過し、計測を行えることが分かった。

しかし、シリンダー型試験体では、鉄筋に導入した引張力の反力を、鉄筋周辺のコンクリートでとっているため、実際の構造物における鉄筋とコンクリートの応力状態と必ずしも一致しない。そこで、本実験では曲げ付着試験体を作成し、より実構造物での応力状態に近い状態で実験を行う。また、導入応力履歴の影響を検討するため、応力状態を複数回変化させて計測を行う。また、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-1 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. 方法

### 加力計画

加力には、図 1 に示すように、センターホールジャッキを用いて荷重制御で行った。加力方向は引抜一方向である。加力方法は自己完結型であり、外部に反力は必要ない。

RESA-1 での計測の後に、同様の試験体を大学試験室で、RESA-1 での加力履歴と同様に単調引張加力を実施し、試験体の性状を確認した。また、RESA-1 では、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $145\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $270\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $145\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $270\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $20\text{N}/\text{mm}^2$  の順に 6 種類の応力で計測を行った。計測は、実験は、2010 年 10 月 28 日 10 時より 11 月 1 日 9 時までの 96 時間において、東海村原子力研究開発機構で行われた。

### 計測計画

鉄筋の引張力は、ロードセル KCM-300KNA(東京測器研究所製)により、データロガー TDS-602 を介して計測した。鉄筋のひずみはひずみゲージ (FLT-2-11-3LT、東京測器研究所製) を D10 鉄筋の両面に貼付し、TDS-602 を介して計測した。

鉄筋の弾性ひずみは、中性子応力測定装置 RESA-1 を用いて計測した。中性子回折法により、鉄筋軸方向の  $\alpha\text{Fe}(110)$  の格子ひずみ変化を測定した。中性子線の波長は  $2.0\text{\AA}$  であり、このときの 110 回折の回折角  $2\theta$  は約  $58.5^\circ$  である。入射側にはビーム高さを  $10\text{mm}$  に制限できる縦収束ラジアルコリメータを設置するとともに、幅方向を  $5\text{mm}$  に制限できるカドミウムスリットを設置することで、測定位置における入射ビーム形状を幅  $5\text{mm}$  高さ  $10\text{mm}$  とした。また、検出器側には幅方向を  $5\text{mm}$  に制限できるラジアルコリメータを設置することで、ゲージボリュームを定義した。中性子の経路を図 2 に示す。

計測では、1 点 30 分の計測で十分な精度の計測が出来たため、1 点 30 分とし、マシンタイムが合計 96 時間であることを考慮して、計測点を表 2 のように決定した。

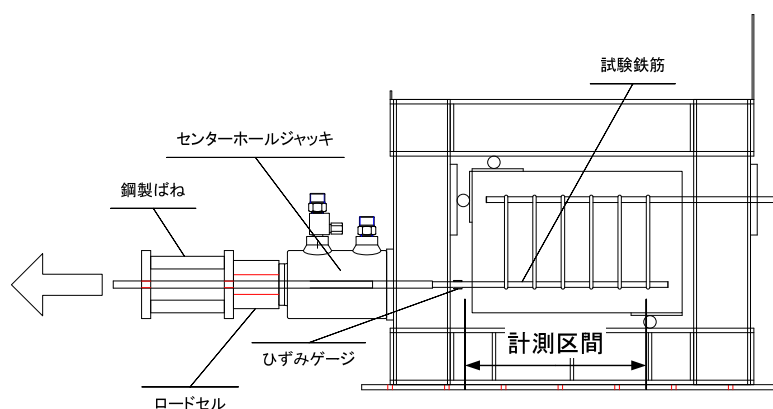


図 1 試験体加力装置

表 1 鉄筋計測位置

引張端からの距離(mm)	22MPa-1	150MPa-1	275Mpa-1	150MPa-2	275Mpa-2	22MPa-2
300	×	×	×	×	計測	計測
290	×	×	×	×	計測	計測
280	×	×	×	×	計測	計測
270	×	×	×	×	計測	計測
260	×	×	×	×	計測	計測
250	×	×	×	×	計測	計測
240	×	×	×	×	計測	計測
230	×	×	×	×	計測	計測
220	×	×	×	×	計測	計測
210	×	×	×	×	計測	計測
200	×	×	×	×	計測	計測
190	×	×	×	×	計測	計測
180	×	×	×	×	計測	計測
170	×	×	×	×	計測	計測
160	×	×	×	×	計測	計測
150	計測	計測	計測	計測	計測	計測
145	計測	×	×	×	×	×
140	計測	計測	計測	計測	計測	計測
135	計測	×	×	×	×	×
130	計測	計測	計測	計測	計測	計測
125	計測	×	×	×	×	×
120	計測	計測	計測	計測	計測	計測
115	計測	×	×	×	×	×
110	計測	計測	計測	計測	計測	計測
105	計測	×	×	×	×	×
100	計測	計測	計測	計測	計測	計測
95	計測	×	×	×	×	×
90	計測	計測	計測	計測	計測	計測
85	計測	×	×	×	×	×
80	計測	計測	計測	計測	計測	計測
75	計測	×	×	×	×	×
70	計測	計測	計測	計測	計測	計測
65	計測	×	×	×	×	×
60	計測	計測	計測	計測	計測	計測
55	計測	×	×	×	×	×
50	計測	計測	計測	計測	計測	計測
45	計測	×	×	×	×	×
40	計測	計測	計測	計測	計測	計測
35	計測	×	×	×	×	×
30	計測	計測	計測	計測	計測	計測
25	計測	×	×	×	×	×
20	計測	計測	計測	計測	計測	計測
15	計測	×	×	×	×	×
10	計測	計測	計測	計測	計測	計測
5	計測	×	×	×	×	×
0	計測	計測	計測	計測	計測	計測
-5	計測	計測	計測	計測	計測	計測
-10	計測	計測	計測	計測	計測	計測

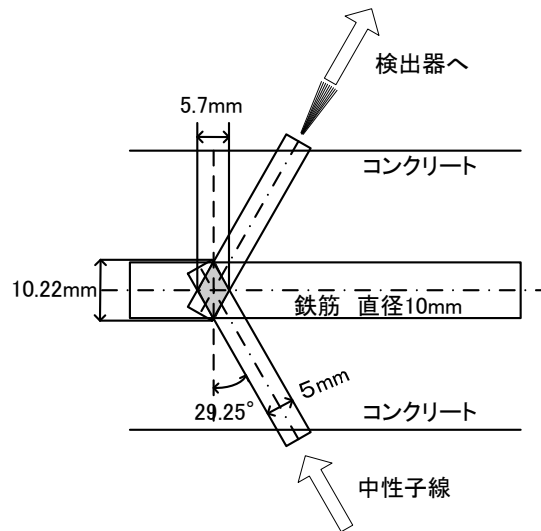


図 2 中性子線の経路

### 3. 研究成果

計測は、20N/mm<sup>2</sup>、145N/mm<sup>2</sup>、275N/mm<sup>2</sup>、145N/mm<sup>2</sup>、275N/mm<sup>2</sup>、20N/mm<sup>2</sup> の6種類の応力で順に計測を行った。試験体の位置を固定して計測をする必要があるため、センターホールジャッキ、ロードセル、鋼製バネをあらかじめ配して、それらが安定する様、20N/mm<sup>2</sup> を最小の導入応力とした。図 3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示す。導入応力は計測時間中ほぼ一定に保たれていることが分かる。

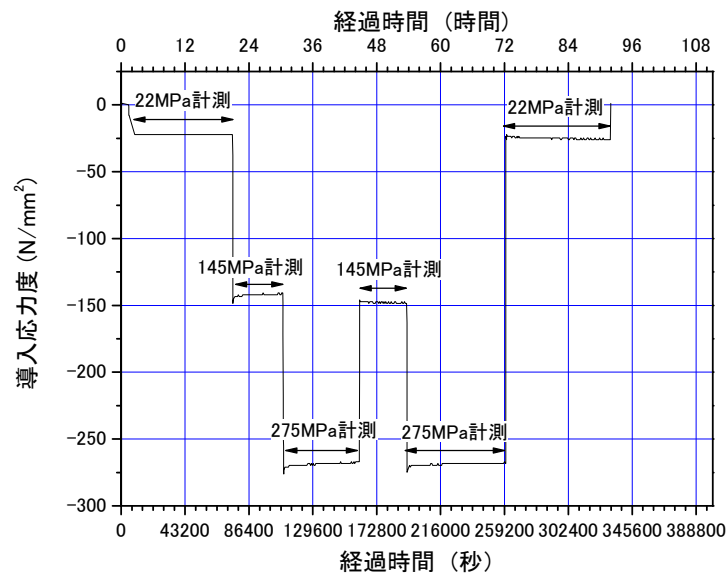


図 3 ロードセルによる応力度の推移

実験では、図 4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。得られて $2\theta$  と、式 1 から、鉄筋の弾性ひずみ分が計算される。ここで、 $2\theta_0$  は無負荷時の回折ピーク強度での回折角である。各応力度ごとに得られた $2\theta$

を図 5 に示す。導入応力が大きくなるに従って、 $2\theta$  が小さくなっていることが分かる。また、およそ 50mm 刻みで、角度が大きく変動する点がある。図 6 には、各点でのガウス近似時の誤差を縦軸に取ったものを示す。殆どの点で誤差はおよそ 0.003 以下と非常に良い精度で計測されているが、およそ 50mm 刻みで誤差の大きい点がある。その位置は、図 5 の角度が大きく変動する点とも一致しており、試験体内の補強筋を中性子が通過した計測点であると考えられる。その為、補強筋により回折強度が低下したと思われる。

式 1 を用いて求めた弾性ひずみ  $\varepsilon$  を図 7 に、図 8 にはその  $\varepsilon$  に 110 回折のヤング係数  $E (= 2.24 \times 10^5)$  をかけて算出した応力を示す。ここで、 $2\theta_0$  は、最後の  $20\text{N/mm}^2$  導入力での引張端からの位置 300mm で計測された回折角 ( $58.63376 \text{ deg}$ ) を用いた。なお、計測されるひずみは分子間距離に拠るため、無負荷状態からの絶対値のひずみとなる。

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

応力については、導入応力  $275\text{N/mm}^2$  の結果を図 9 に、導入応力  $145\text{N/mm}^2$  の結果を図 10 に、導入応力  $20\text{N/mm}^2$  の結果を図 11 にそれぞれ示す。導入応力  $275\text{N/mm}^2$  では、2 回ともほぼ同じ引張応力度分布となっている。一方、導入応力  $145\text{N/mm}^2$  および  $20\text{N/mm}^2$  では、2 回目の引張応力度の低下が、1 回目に比べて緩やかであることが分かる。

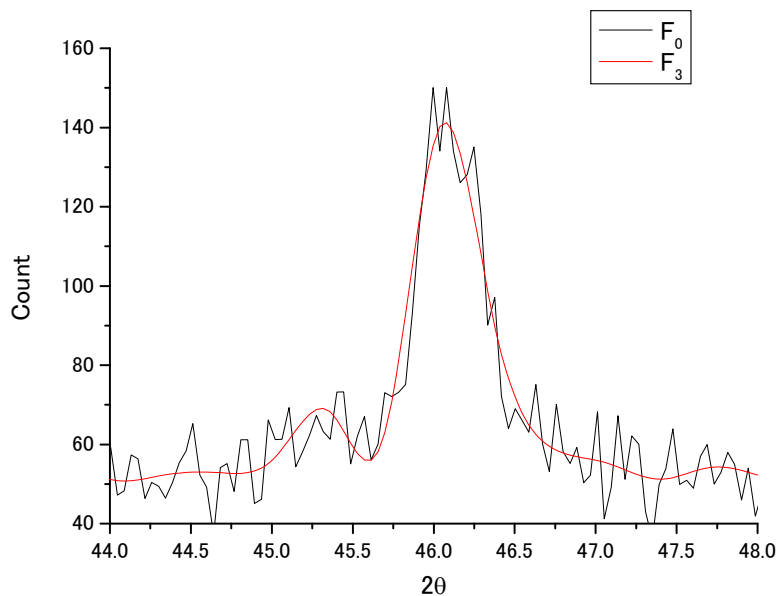


図 4 計測結果の一例

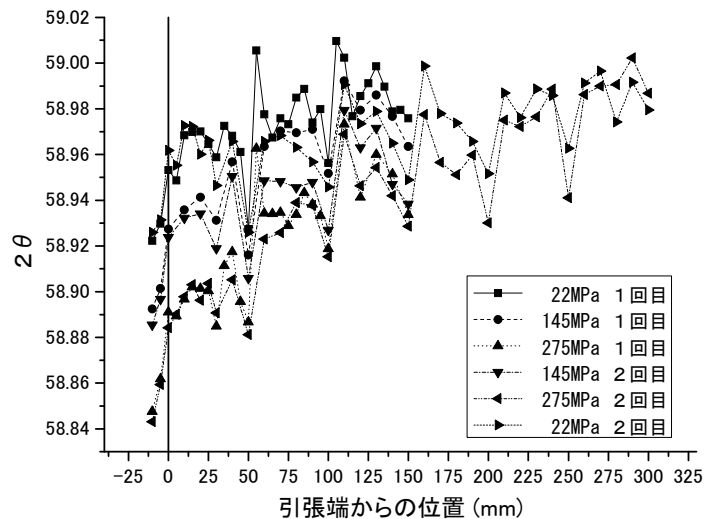


図 5 計測された回折角  $2\theta$  [deg]

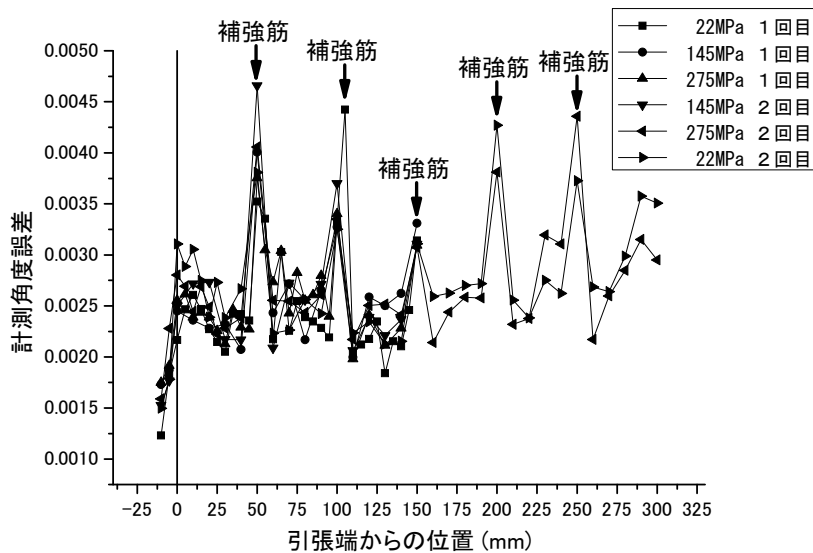


図 6 計測された回折角  $2\theta$  のガウス近似誤差 [deg]

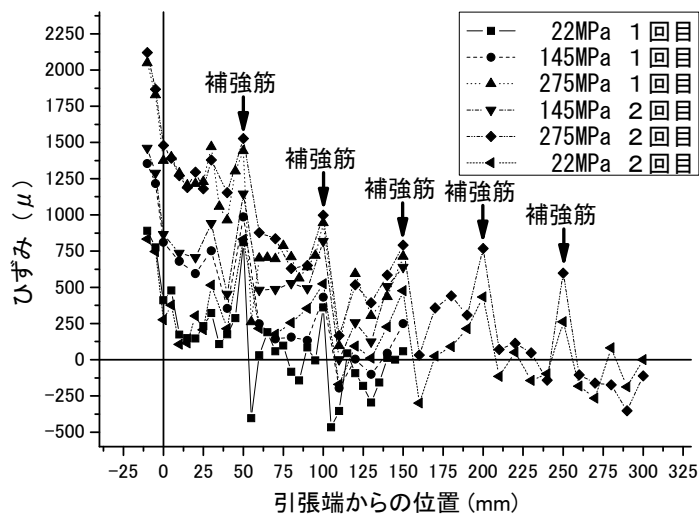


図 7 算出したひずみ

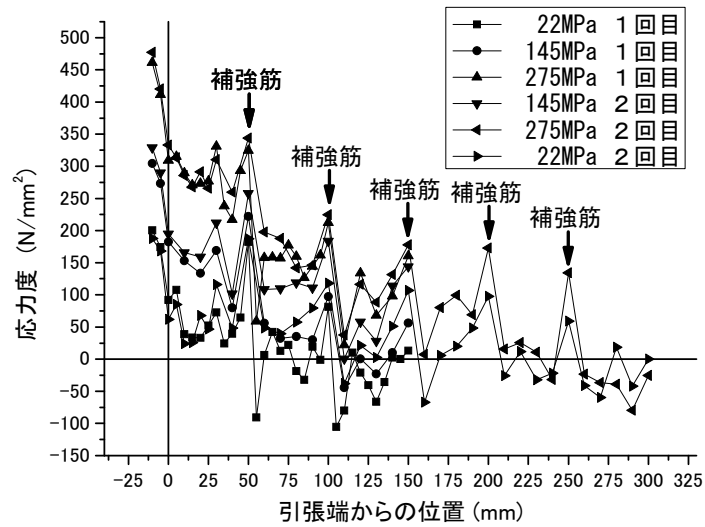


図 8 算出した応力度

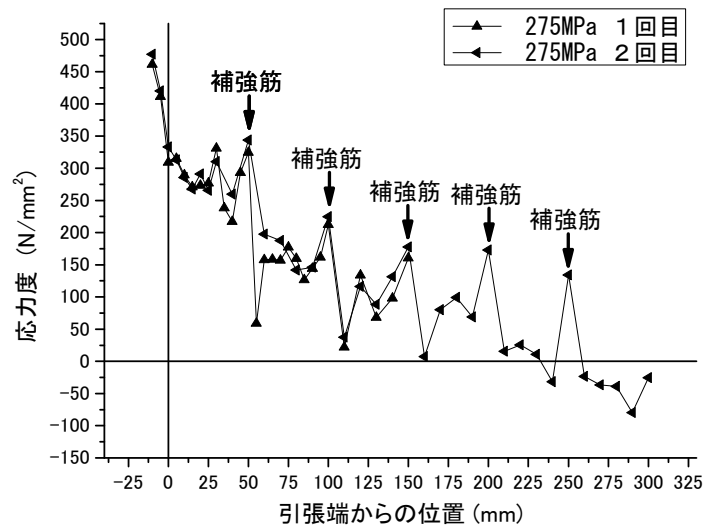


図 9 算出した応力度 (275N/mm<sup>2</sup>時)

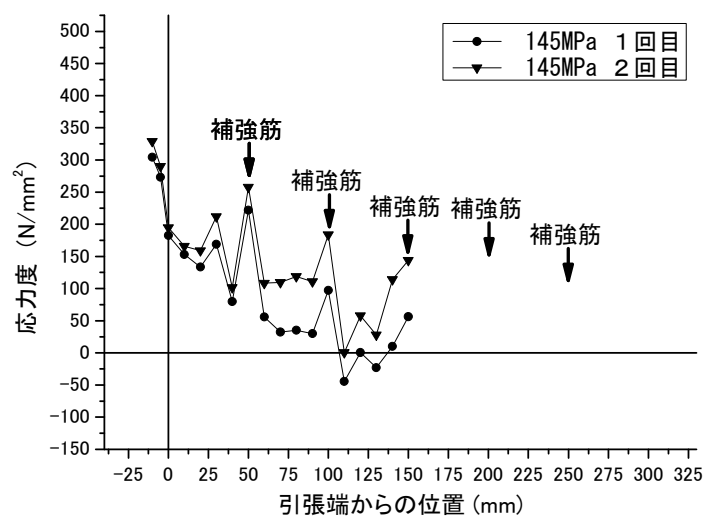


図 10 算出した応力度 (145N/mm<sup>2</sup>時)

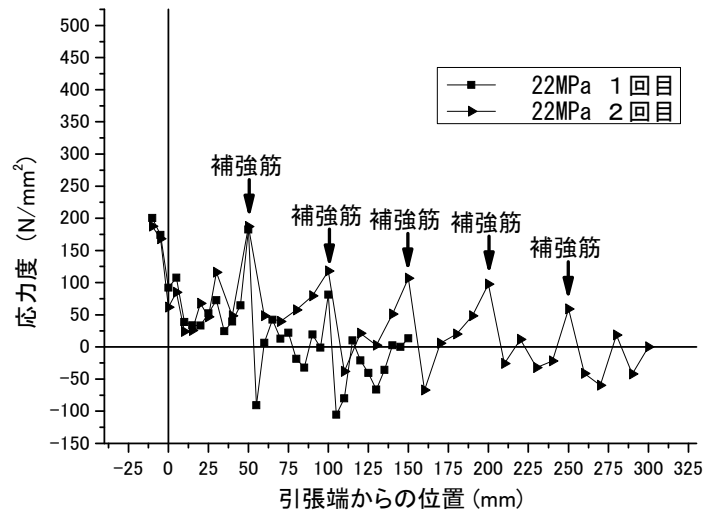


図 11 算出した応力度 (22N/mm<sup>2</sup>時)

図 9～図 11を見ると、せん断補強筋を中性子が通過する場合、およびコンクリート外の鉄筋部分の計測性状は、コンクリート内の主筋と異なっていることが見受けられる。そこで、計測性状の違いを緩和するため、全ての計測を「22N/mm<sup>2</sup> 2回目の計測に対する相対値」を算出する。その結果を図 12に示す。145N/mm<sup>2</sup> 2回目では、145N/mm<sup>2</sup>の引張応力度分布と交わるまで、ほぼ一定応力度になっていることが分かる。

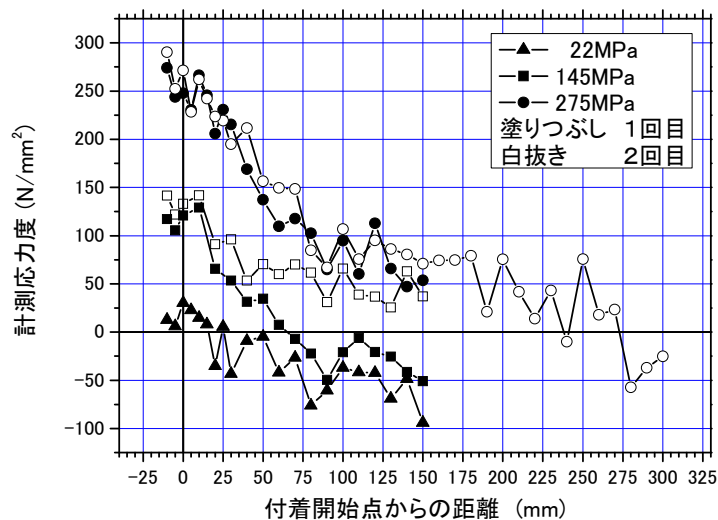


図 12 算出した応力度 (22N/mm<sup>2</sup> 2回目との差分)

#### 4. 結論・考察

本節では、RESA-1 による計測と、ひずみゲージによる計測の比較を試みる。なお、RESA-1 による計測では、ひずみの絶対値が計測できるのに対して、ひずみゲージによる計測では、初期応力によるひずみは考慮していないことに注意が必要である。図 13～図 15は、それぞれ 275N/mm<sup>2</sup>、145N/mm<sup>2</sup>、20N/mm<sup>2</sup> 導入時の、RESA-1 での計測応力度と、ひずみゲージで計測した値にヤング係数を乗じた結果を合わせて示している。275N/mm<sup>2</sup> 導入時には、おおよそ RESA-1 による計測とひずみゲージによる計測は対応しており、2 回ともほぼ同じ引張応力度分布になることも共通している。ただし、RESA-1 での計測は、50mm～150mm



の区間で、ひずみゲージによる計測値を  $50\text{N/mm}^2$  程度下回っている。また、コンクリート外の鉄筋の応力が導入応力を大きく超えている。これは、RESA-1 での  $2\theta_0$  の値として、2 回目の  $20\text{N/mm}^2$  計測時の端部から  $300\text{mm}$  での値を用いたが、この値が必ずしも全ての鉄筋の測定点での  $2\theta_0$  と一致しないこと、およびひずみゲージの計測では初期ひずみを考慮していないことに起因すると考えられる。

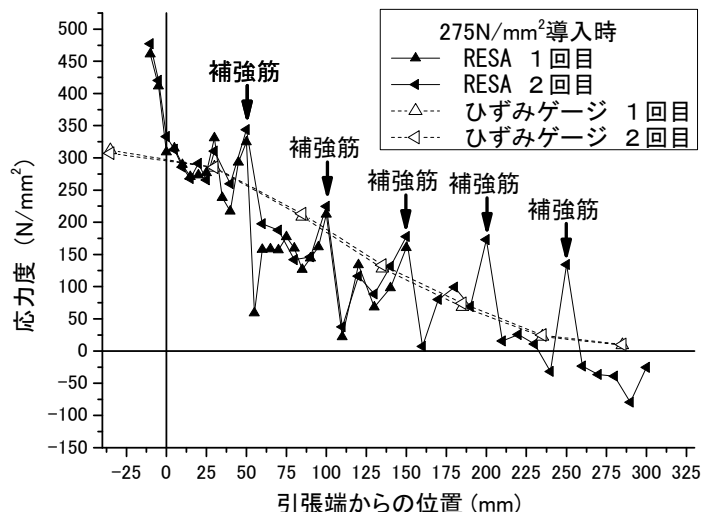


図 13 RESA-1 による計測とひずみゲージによる計測 ( $275\text{N/mm}^2$ )

同様に、 $145\text{N/mm}^2$  導入時には、図 14 に示すように RESA-1 での計測は、ひずみゲージによる計測値を  $50\text{N/mm}^2$  程度下回っている。しかし、1 回目の計測では、おおよそ単調に引張力が減少していくのに対して、1 度  $275\text{N/mm}^2$  まで導入した後の 2 回目では、端部から  $100\text{mm}$  程度まで応力度が一定となっている傾向は一致している。また、コンクリート外の鉄筋の応力が導入応力を大きく超えているが、これも  $275\text{N/mm}^2$  導入時と同じく、 $2\theta_0$  の採用値およびひずみゲージによる計測における初期ひずみの影響と思われる。

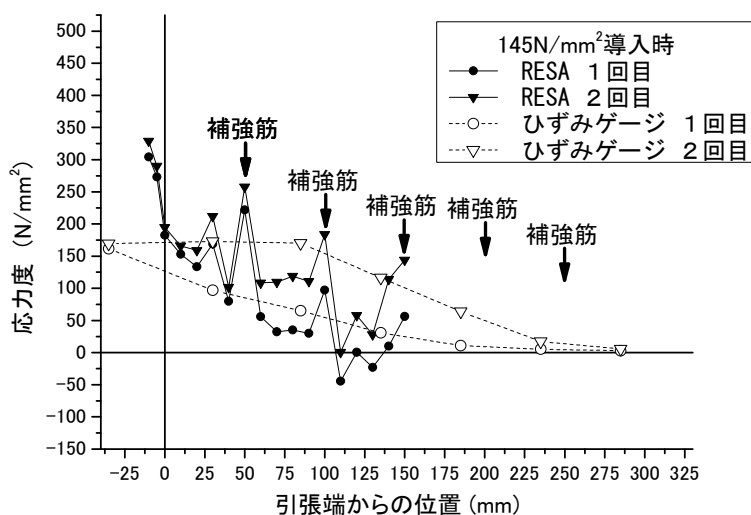


図 14 RESA-1 による計測とひずみゲージによる計測 ( $145\text{N/mm}^2$ )

$20\text{N/mm}^2$  導入時には、図 15 に示すように RESA-1 での計測は、1 回目の計測結果と、 $145\text{N/mm}^2$  および  $275\text{N/mm}^2$  を導入した後の 2 回目の計測結果では、端部から  $50\text{mm}$  以遠で若干、2 回目の計測結果の応力が大きくなっている傾向が見受けられるが、ひずみゲージによる計測結果ほど明確ではない。これも

275N/mm<sup>2</sup> 導入時と同じく、 $2\theta_0$  の採用値およびひずみゲージによる計測における初期ひずみの影響と思われる。

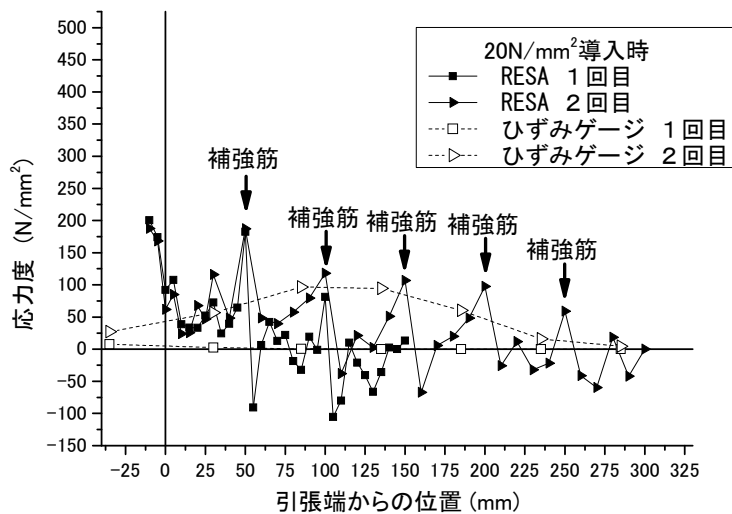


図 15 RESA-1 による計測とひずみゲージによる計測 (20N/mm<sup>2</sup>)

以上のように、計測では鉄筋やコンクリートの性状が計測ポイント毎に異なり、無負荷状態での数点の計測結果から、全長に渡って $2\theta_0$ を定義することが困難であることが分かった。今回は、実験時間の時間的制約および、無負荷状態で試験体の位置が安定しないことから、全長に渡って無負荷状態での計測を実施することが出来なかったが、次回以降は、最初に無負荷状態での全長に渡った計測が必要である。

また、ひずみゲージによる計測では、初期ひずみの影響は考慮されていない。そこで、本実験では、最後に計測した 20N/mm<sup>2</sup> 導入時 2 回目の計測結果に対する、全ての計測結果の差分（相対値）を求め、ひずみゲージによる計測結果（同じく 20N/mm<sup>2</sup> 導入時に対する相対値）との比較を試みた。図 16 にその結果を示す。ひずみゲージによる計測結果と、中性子による計測結果は非常に良く対応していることが分かる。

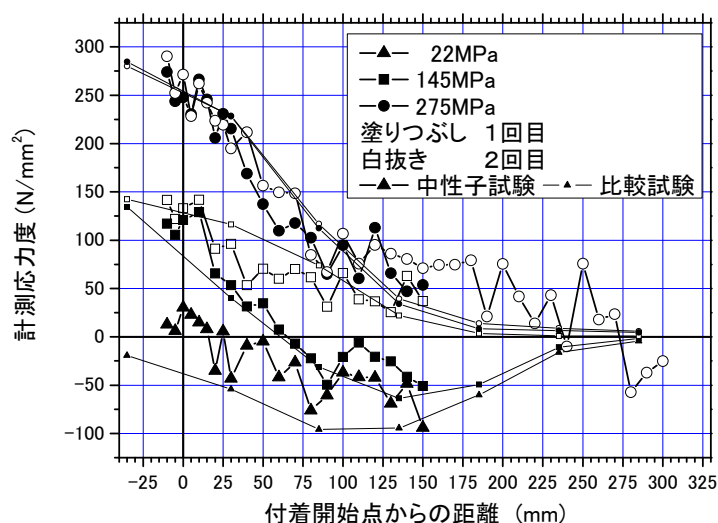


図 16 RESA-1 による計測とひずみゲージによる計測 (20N/mm<sup>2</sup> との相対)

5. 引用(参照)文献等