ひび割れ近傍の付着破壊領域における鉄筋応力の非破壊測定

Nondestructive measurement of stress distribution of reinforcing steel by the neutron diffractometer

安田正雪[1)]　荒金直樹[1)]　野口貴文[2)]
Masayuki YASUDA　Naoki ARAGANE　Takafumi NOGUCHI
兼松　学[3)]　丸山一平[4)]　鈴木裕士[5)]
Manabu KANEMATSU　Ippei MARUYAMA　Hiroshi SUZUKI

[1)]東洋建設（株）　[2)]東京大学　[3)]東京理科大
[4)]名古屋大学　[5)]日本原子力研究開発機構

（要約２～３行）
本研究では、鉄筋コンクリートのひび割れ近傍の鉄筋応力分布を明らかにすることを目的とし、昨年度トライアルユースの成果を踏まえ、試験体精度やひび割れ導入精度の向上を図り、再度ひび割れ近傍における鉄筋コンクリート中の鉄筋応力測定を試みた。

キーワード：
鉄筋コンクリート、ひび割れ、付着破壊領域、鉄筋応力

１．目的

鉄筋コンクリート造の特徴は、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鉄筋を相補的に組み合わせた複合材料であるが、これら相補的関係は鉄筋とコンクリートの付着特性によって左右され、ひび割れ挙動や鉄筋コンクリート部材の特性に大きな影響を与えることが知られている。このことよりも、鉄筋コンクリート内部の鉄筋とコンクリートの正確な付着応力分布を把握することは重要である。

これまで、鉄筋の応力は鉄筋表面に箔ゲージを離散的に貼付することにより測定されることが一般的であった。しかし、ゲージ部の防水処理や配線の取り回しなどが付着特性におよぼす影響が無視できないと考えられており、鉄筋表面に溝を切ったりくり抜いた鉄筋内部にゲージを貼付したりして、系への影響を最小限にとどめる努力が為されてきた。しかしながら、ゲージを用いた測定では、このように配慮したとしてもなんらかの因子が系へ影響を与える懸念は完全に払拭することはできず、非破壊・非接触での測定法の確立が望まれている。

そこで、本実験では中性子回折法を利用した非破壊・非接触による鉄筋コンクリート中の鉄筋とコンクリートの付着応力分布の把握を目的とし、残留応力解析用中性子回折装置(RESA)を用いた鉄筋とコンクリート中の鉄筋応力の測定を行ってきた。2007 年度トライアルユースでは[1)]、RESA のコンクリート分野への適用に関する諸事検討を行い、鉄筋コンクリート試験体への測定可能性が確認され、鉄筋コンクリート中の鉄筋応力分布の測定が可能であることおよびコンクリート中の鉄筋応力の測定が可能であることを明らかにした。

これら成果を踏まえ、2008 年度 10 月実施の実験ではひび割れ近傍の付着応力分布の把握を目的とし、ひび割れ周辺およびひび割れを含む範囲の鉄筋コンクリート中の鉄筋応力測定を実施した。

２．方法

２．１ 実験実施日および参加者

実験実施美および実験参加者を表 1 に示す。

表１　実験実施日および実験参加者

実験実施日	実験参加者（敬略称）
2008 年 10 月 9 日(木)～2008 年 10 月 13 日(月)	兼松学（東京理科大学） 西川葉志乃（東京理科大学 修士 1 年） 太田匠美（東京理科大学学部 4 年） 長井宏憲（東京大学） 安田正雪（東洋建設） 荒金直樹（東洋建設）
2009 年 3 月 6 日(金)～2009 年 3 月 10 日(火)	兼松学（東京理科大学） 西川葉志乃（東京理科大学 修士 1 年） 太田匠美（東京理科大学学部 4 年） 長井宏憲（東京大学） 荒金直樹（東洋建設）

２．２ 測定装置概要

本研究における中性子回折残留応力測定は、全て(独)日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3 を中性子線源とする熱中性子ポートに設置されているRESA を用いて実施した。

図－1 に測定装置概要（光学系）を示す。スリットを介してビームを照射し，試料中の格子面で回折した中性子を，中性子検出器(一次元検出器)により測定する。このとき，中性子線は入射スリットおよびラジアルコリメータにより行路を制御され、入射スリットから平行に伸びた経路と，ラジアルコリメータにより制限している領域が交差する約 5×5×10㎜ の菱形の空間（図－1 左下）が測定範囲となる。測定により得られた回折角度および回折強度（中性子検出カウント数）の関係をガウスフィッティングによりピーク角度 2θ を得た。

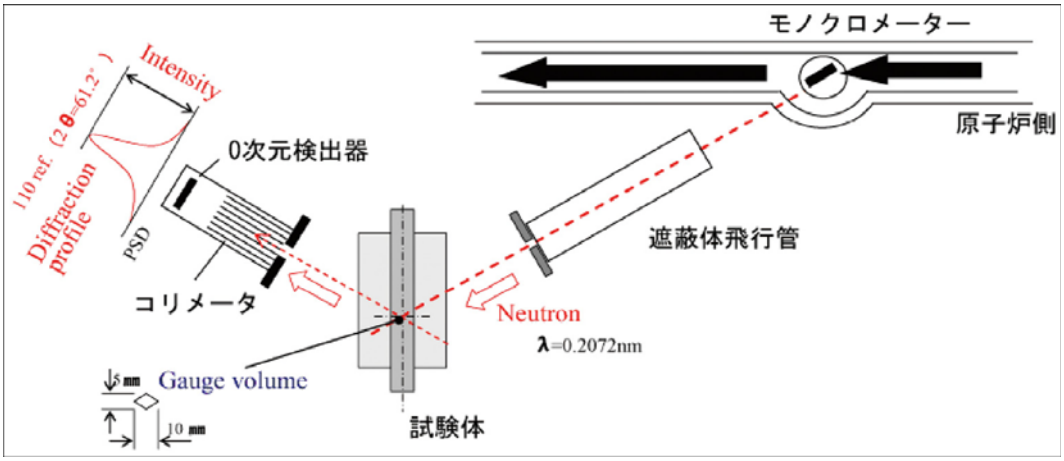


図１　光学系

２．３　実験概略

本研究課題における実験の水準を表２に示す。

本研究では主に、建築用鋼材を測定した際の誤差の評価、試験体端部およびひび割れ近傍におけるコンクリート中の付着応力の実測を行った。

表２　測定水準

実施年	実験名	断面寸法 (mm)	鉄筋	荷重 (N/mm²)	照射スリットサイズ	測定長	測定ピッチ	測定点数
2008 年	鉄筋のみ測定	-	D10 たけ	0,100,200,300	D3×H3mm	-	-	1 点 6 回
	RC 拘束湿潤	50×50	D10 たけ	-	D2×H2mm	4.5mm	1.5mm	4 点
	RC 乾燥	50×50	D10 たけ	0,200	D3×H3mm	360mm	5mm	70 点
2009 年	鉄筋のみ測定	-	D10 たけ	0,100,200,300	D3×H15mm	-	-	1 点 6 回
	測定Ⅰ（RC 乾燥）	50×50	D10 たけ	0,50,150,250,300		100mm	2mm	51 点
	測定Ⅱ（RC 乾燥）	50×50	D10 たけ	0,30,60,90,150		146mm	2mm	74 点

２．３．１　鉄筋コンクリート用棒鋼の応力測定

(1)目的　　鉄筋コンクリート用棒鋼の応力測定にあたり、その基礎物性および基本的特性を把握することを目的として、鉄筋のみを用いた実験を実施した。また、想定される３つの誤差、測定の際に生じる系統誤差、ガウスフィッティングによる解析の際に生じるフィッティング誤差、および材料自体が有する品質のばらつき、について検討を行う。

(2)試験体　　普通たけ節棒鋼（SD345 D10、節ピッチ 6.475mm）。鉄筋の力学特性を表１に示す。

表３　鉄筋の力学的性質

呼び名	D[mm]	As[mm²]	Ft [N/mm²]	Fy[N/mm²]	Es[N/mm²]
D10	9.53	71.33	527.0	371.8	1.80×10^5

図２　鉄筋中央たけふし部（2009 年 3 月実施）

図３　鉄筋（テープ巻き付け部の座標は X=16.239）（2009 年 3 月実施）

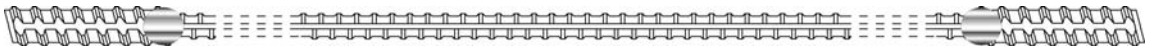


図４　使用した鉄筋溶接概要

(3)測定水準　　0 N/mm²、100 N/mm²、200 N/mm²、300 N/mm²

(4)測定箇所　　X=-16.25 においては 1 点に対し 6 回の測定を行った（0 N/mm²、100 N/mm²、200 N/mm²、300 N/mm²）。また、0 N/mm²、200 N/mm²については、30mm の範囲内において 1mm ピッチで 1 点に対し 1 回の測定を行い、ある範囲内における材料自体が有する回折角のばらつきについて検討した。

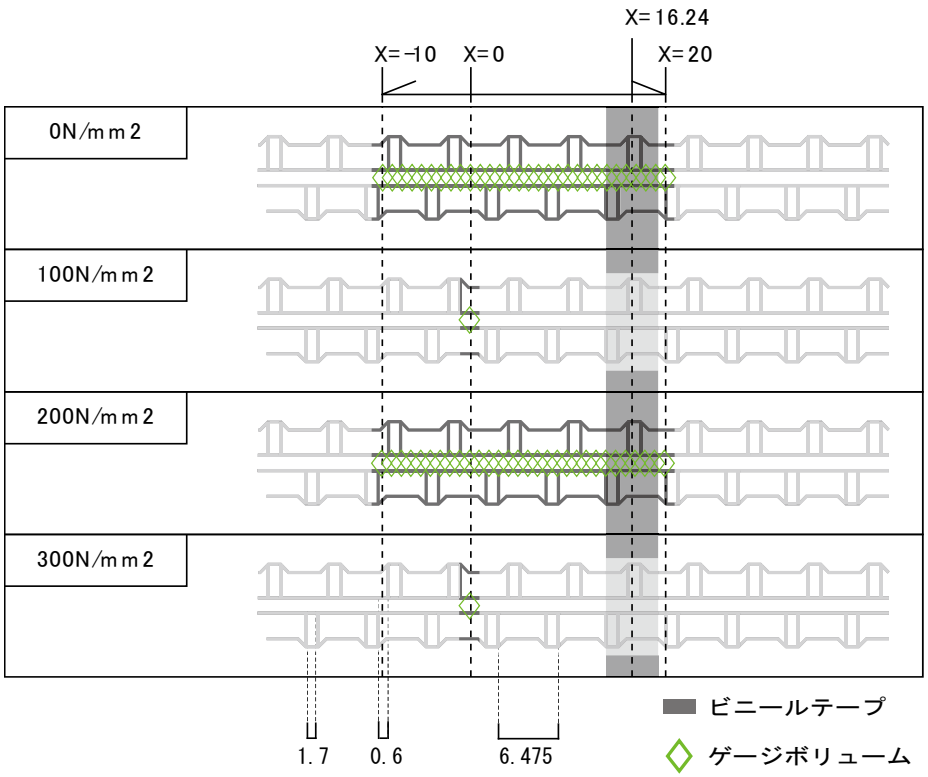


図５　鉄筋測定範囲（2009 年 3 月実施）

２．３．２　ひび割れ近傍における付着応力分布 測定概要

（1）目的　　ひび割れ部周辺における付着応力分布を把握することを目的とする。

（2）試験体　　以下に示す鉄筋コンクリート試験体を用いる。

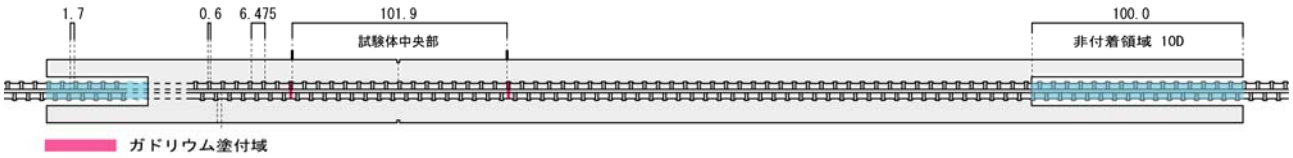


図６　鉄筋コンクリート試験体概要図

表４　試験体仕様詳細

鉄筋	鉄筋のみの測定に用いた同一の鉄筋を使用した(表 1)。 普通たけ節棒鋼（SD345 D10、節ピッチ 6.475mm）
コンクリートの調合	表 4a　使用したコンクリートの調合表

調合強度 N/mm2	スランプ cm	空気量 %	水セメント比 %	粗骨材の最大寸法 mm	細骨材率 %	単位水量 kg/m3	絶対容積(l/m3) セメント	絶対容積(l/m3) 細骨材	絶対容積(l/m3) 粗骨材	質量(kg/m3) セメント	質量(kg/m3) 細骨材	質量(kg/m3) 粗骨材	混和剤
31.0	18	4.0	65.0	10	49.0	185	91	335	349	285	869	925	8N*1.0%

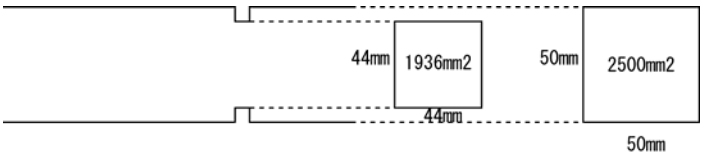
<table>
<tr><td></td><td>■使用材料
□普通ポルトランドセメント（太平洋セメント：セメント強度 61.3N/mm²、密度 3.15）
□細骨材（大井川産陸砂：密度 2.58）
□粗骨材（青梅産硬質砂岩砕石：密度 2.65）
□AE 減水剤（ポゾリス No.70）</td></tr>
<tr><td>コンクリートの材齢 28 日強度</td><td>表 4b 強度試験結果（JIS A 1108、JIS A 1113）
<table>
<tr><td colspan="2">圧縮</td><td>引張</td></tr>
<tr><td>水中
(N/mm²)</td><td>気乾
(N/mm²)</td><td>水中
(N/mm²)</td></tr>
<tr><td>31.8</td><td>24.9</td><td>2.8</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>コンクリートの養生方法</td><td>打設～24 時間後：脱型
24 時間～材齢 5 日：気中養生（20℃RH65%の恒温恒湿室）
材齢 5 日～材齢 26 日：中性化促進炉にて中性化促進養生
材齢 26 日～材齢 28 日：105℃乾燥
材齢 28 日～材齢 31 日：密封して気中に養生
材齢 31 日日にて試験</td></tr>
<tr><td>ガドリニウムの塗布</td><td>ガドリニウム（Gd、原子番号 64）は、減弱係数（質量吸収係数）が高く、中性子線が非常に透過しにくい元素であることが知られている。今回は、RESA での測定位置（測定座標）を正確に把握するため、ガドリニウムを混入したエポキシ塗料を鉄筋に塗布した。</td></tr>
<tr><td>切り欠き</td><td>すべての試験体において、中央部に切り欠きを有する。切り欠きは断面欠損部にひび割れを集中させるために作成し、その深さは、断面積が 8 割程度になるように、切り欠き深さは 3mm とする。
（1936/2500mm²＝77.4%）
 

図 4a　切欠き部</td></tr>
<tr><td>ひずみゲージ</td><td>コンクリート部 1/4 付近およびコンクリート外部の両端の鉄筋表裏にひずみゲージを貼付けした。
東京測器研究所：TML ひずみゲージ
GAUGE　LENGTH：5mm
GAUGE　FACTOR：　2.11±1%
校正係数 Kc：Kc=2.00/2.11＝0.94786≒0.9479</td></tr>
</table>

(3)測定水準　　0 N/mm²、50N/mm²、150N/mm²、250 N/mm²

(4)測定箇所　　試験体中央部 X=-50 から X=50 の範囲において、2mm ピッチで 51 点測定した。

２．３．３　試験体端部の付着応力分布の実測

(1)目的　　両引き試験における試験体端部付着応力分布の非破壊測定。

(2)試験体　　測定Ⅱに用いた試験体と全く同一の仕様で作成した鉄筋コンクリート試験体を用いる（4.1(2)参照）。

(3)測定水準　0 N/mm²、30N/mm²、60N/mm²、90 N/mm²、150N/mm²

(4)測定箇所　　試験体中央部 X=0 から X=146 の範囲において、2mm ピッチで 74 点測定した。また、90 N/mm² 載荷時では、X=-150 から X=0 における範囲も測定を行った。

３．研究成果

３．１　鉄筋コンクリート用棒棒鋼の応力測定

３．１．１　初期回折角の算定

図７に鉄筋のみ 1 点に対し 6 回の測定を行った結果を示す。図７に示すグラフの値は 0 N/mm²、100 N/mm²、200 N/mm²、300 N/mm² における同点 6 回の測定結果を平均した値である。

また、図８に示すグラフの値は 2008 年 10 月に実施した実験結果で、0 N/mm²、100 N/mm²、200 N/mm²、300 N/mm² における同点 6 回の測定結果を平均した値である。

2009 年 3 月実施の試験結果について各応力 6 回の測定結果を平均したものを線形で近似した結果（式１）から初期回折角を 58.718 度とした。

$$y = -0.0004x + 58.7178 \qquad \text{（式１）}$$

表５に、2009 年 3 月に実施した各応力における回折角および標準偏差、およびその応力に換算した値、フィッティング誤差およびその応力に換算した値を示す。

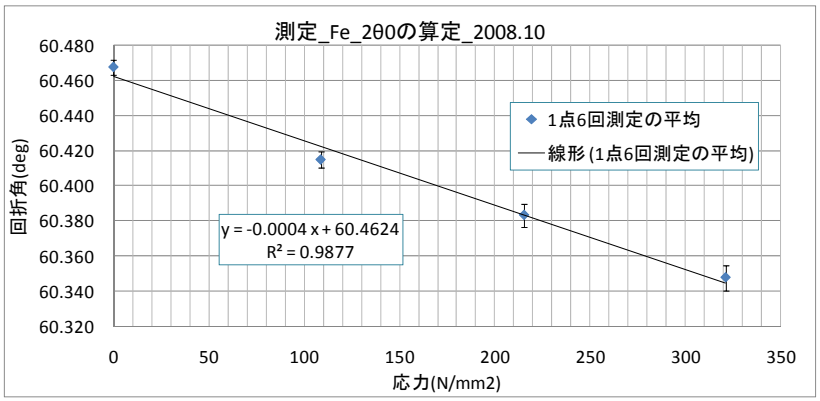


図７　$2\theta_0$の算定（2008 年 10 月実施）

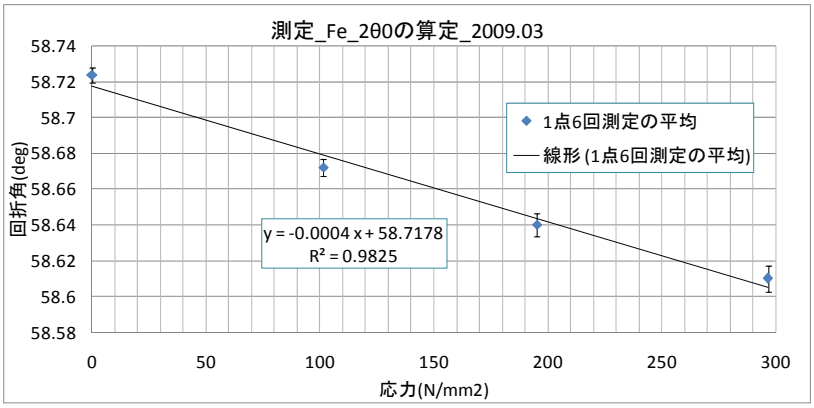


図８　$2\theta_0$の算定（2009 年 3 月実施）

表５　鉄筋のみ測定結果

			0N/mm²	100N/mm²	200N/mm²	300N/mm²
2009年3月	同点6回（平均）	回折角(deg)	58.724	58.672	58.640	58.610
		標準偏差(deg)	0.004321	0.004607	0.006449	0.007295
		応力換算値（N/mm²)	15.014	16.008	22.408	25.351
		フィッティング誤差(deg)	0.001161	0.001154	0.001258	0.001373
		応力換算値（N/mm²)	4.033	4.010	4.373	4.772
	異点30点（平均）	回折角(deg)	58.727		58.645	
		標準偏差(deg)	0.004668		0.006430	
		応力換算値（N/mm²)	16.222		22.334	
		フィッティング誤差(deg)	0.001190		0.001299	
		応力換算値（N/mm²)	4.136		4.515	
2008年10月	同点6回（平均）	回折角(deg)	60.468	60.415	60.383	60.348
		標準偏差(deg)	0.005252	0.005398	0.004028	0.006256
		応力換算値（N/mm²)	17.618	18.107	13.511	20.986
		フィッティング誤差(deg)	0.001887	0.001858	0.001635	0.001828
		応力換算値（N/mm²)	6.329	6.234	5.485	5.485

			0N/mm²	50N/mm²	100N/mm²	150N/mm²	2000N/mm²
2007年11月	異点11点（平均）	回折角(deg)	46.213	46.201	46.193	46.177	46.168
		標準偏差(deg)	0.003722	0.006043	0.002912	0.006429	0.00399
		応力換算値（N/mm²)	17.052	27.687	13.342	29.455	18.297
		フィッティング誤差(deg)	0.002095	0.001797	0.001819	0.001805	0.001916
		応力換算値（N/mm²)	9.596	8.234	8.334	8.267	8.780

３．１．２　考察

（１）系統誤差

表 2 中の 2009 年 3 月に実施した各応力における回折角および標準偏差、およびその応力に換算した値をみると、載荷応力が上昇するとその誤差も大きくなっていることがわかる。この原因として、応力が上昇するにつれて鋼材中の結晶面のゆがみの増大や結晶配列の乱れなどの可能性があると思われる。

以下の図 11 は、2009 年 3 月に実施した同点 6 回の測定において、全 6 回の平均値と測定回数ごとの平均値との差を式 5 によって求め図示したものである。

$$\left|\overline{A}\right| = \left|\frac{\sum_{1}^{n} A}{n} - \frac{\sum_{1}^{N} A}{N}\right| \qquad \text{（式 5）}$$

0N/mm² および 200N/mm² では測定回数が増すごとに全 6 回との差が減少している様子が伺えたが、300N/mm² では逆に上昇している様子が伺え、測定回数を増やせば測定精度が上がるとは一概に言えるが、逆に品質のばらつきは誤差の範囲内ということも出来る。

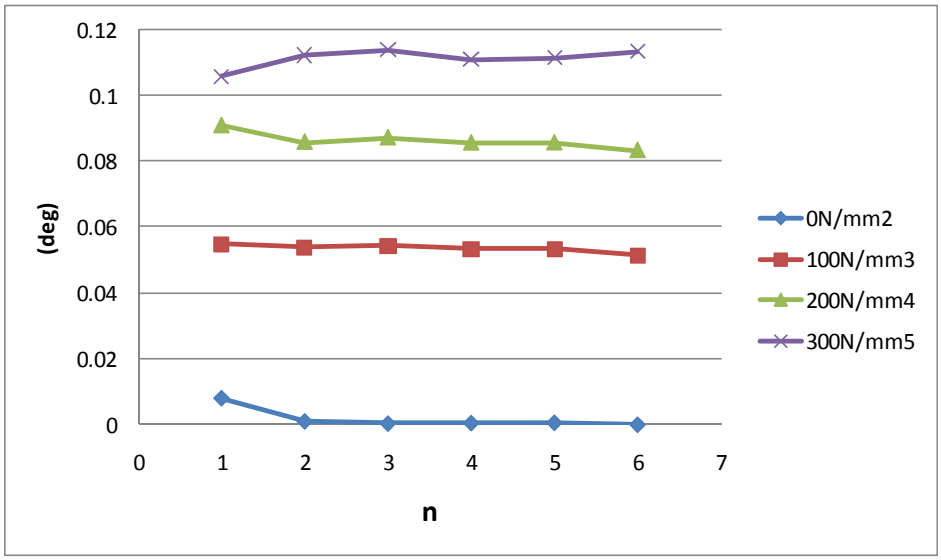


図９　測定回数による誤差の変化（2009 年 3 月実施）

（２）フィッティング誤差

RESA での測定では回折強度分布が得られるのみで、得られた値より応力に換算するには RESA での測定で得られた回折角分布を正規分布としガウスフィッティングを行い、１地点でのピーク角度を得る必要がある。この際に生じるフィッティング誤差を検討する。

表 2 中のフィッティング誤差およびその下段の応力換算値とは測定した値をガウスフィッティングした際に得られる標準偏差の測定回数平均、およびその値を応力に換算した値である。

系統誤差と比較するとその値の 1/4 程度と小さい値を示している点、また系統誤差では応力上昇に伴って上昇を示していたがフィッティング誤差ではそのような傾向はみられない点、以上の 2 点からフィッティングによる誤差は解析精度にあまり影響を与えないものと推察される。

（３）材料自体が有する回折角のばらつき

図１０および図１１に 0 N/mm^2、200 N/mm^2 の 2 応力において約 30mm の範囲を測定した結果を示す。また、表 2 中に異点 30 点の測定結果（30 点の平均値）および標準偏差（30 点測定時）、その応力換算値、フィッティング誤差（30 点の平均値）およびその応力換算値を示す。

2009 年 3 月実施の測定結果をみると、その誤差は約 15 N/mm^2 程度生じている。これは系統誤差と比較するとほぼ同程度であることがわかる。ただし、この 30 点の測定に関しては 1 点に対し 1 回の測定しか行っておらず、系統誤差により生じた誤差なのか、もともと材料自体が有する品質のばらつきなのかの判別は難しいものと思われる。

よって次回の測定では、異点連続測定においても測定回数を複数に増やし、系統誤差により生じた誤差との比較検討が必要であると思われる。

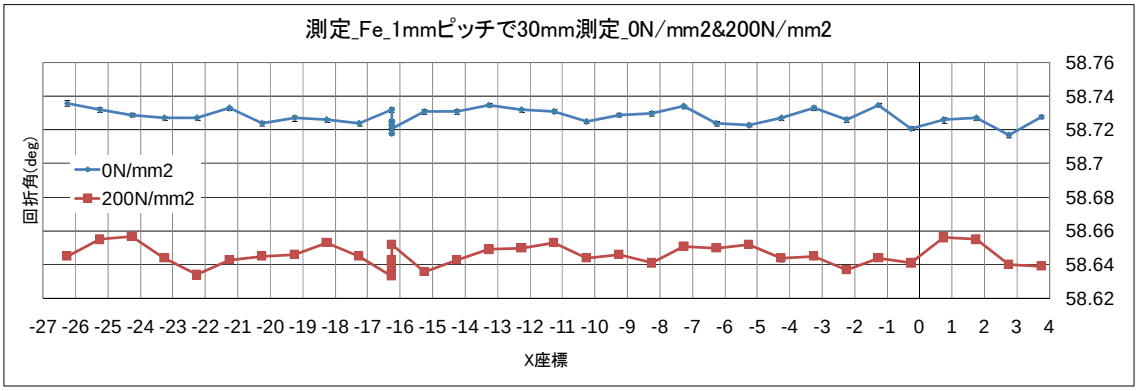


図１０　30mm 内の回折角分布（2009 年 3 月実施）

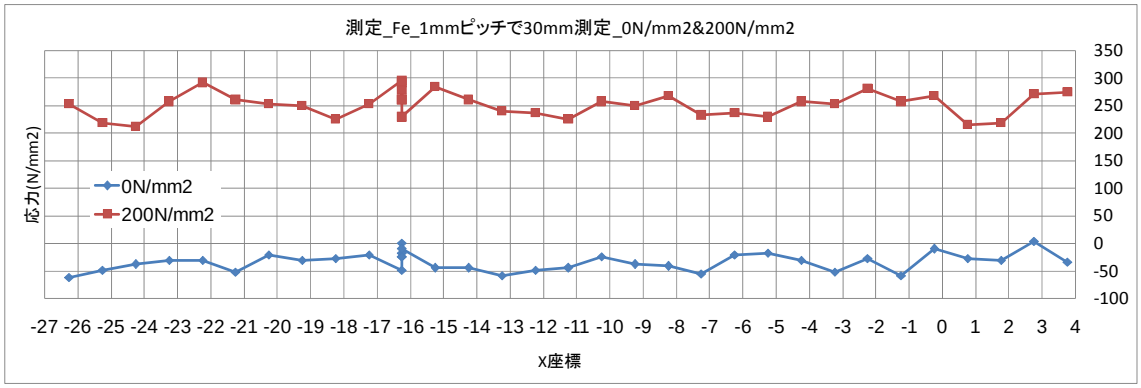


図１１　30mm 内の応力分布（2009 年 3 月実施）

３．１．３　建築用鉄筋の成果まとめ

(1) RESA による測定誤差について検討した。同じ点を 6 回測定した結果から、0N/mm^2 で標準偏差が応力換算で 15 N/mm^2、0N/mm^2 で標準偏差が 25N/mm^2 程度であった。

(2) フィッティング誤差は応力換算で 5 N/mm^2 程度であった。

(3) 材料の品質の場所による差異は、本測定の範囲では、(1) の誤差と同程度であり、有意な差は確認されなかった。この点についてはさらなる検討を要する。

３．２　ひび割れ近傍における付着応力分布 測定概要

測定結果を図１２に示す。点線は各応力状態の回折角より算定した応力を示しており、実線はその連続した 5 点の平均値を示しているものである。ただし、-50mm 付近で応力が上昇しているのは-50mm 付近に位置決めのために塗布したガドリニウムが存在しているためであり、この付近の測定精度はかなり低いものと思われる。

図１２より、応力を徐々に導入しているにもかかわらず鉄筋の応力状態は、平坦に上昇しているのみであることがわかり、応力を導入する以前からすでにひび割れが貫通および測定範囲内での付着が破壊されていたものと思われる。外部からのひび割れ観察状況をみると、0 N/mm^2 時より導入されていたひび割れはそれ以降進展していない。0 N/mm^2 から 50 N/mm^2 へと上昇させているにも関わらず、鉄筋負担分の応力は上昇していないことから、この範囲内でコンクリート内部での付着破壊が生じた可能性が示唆できる。

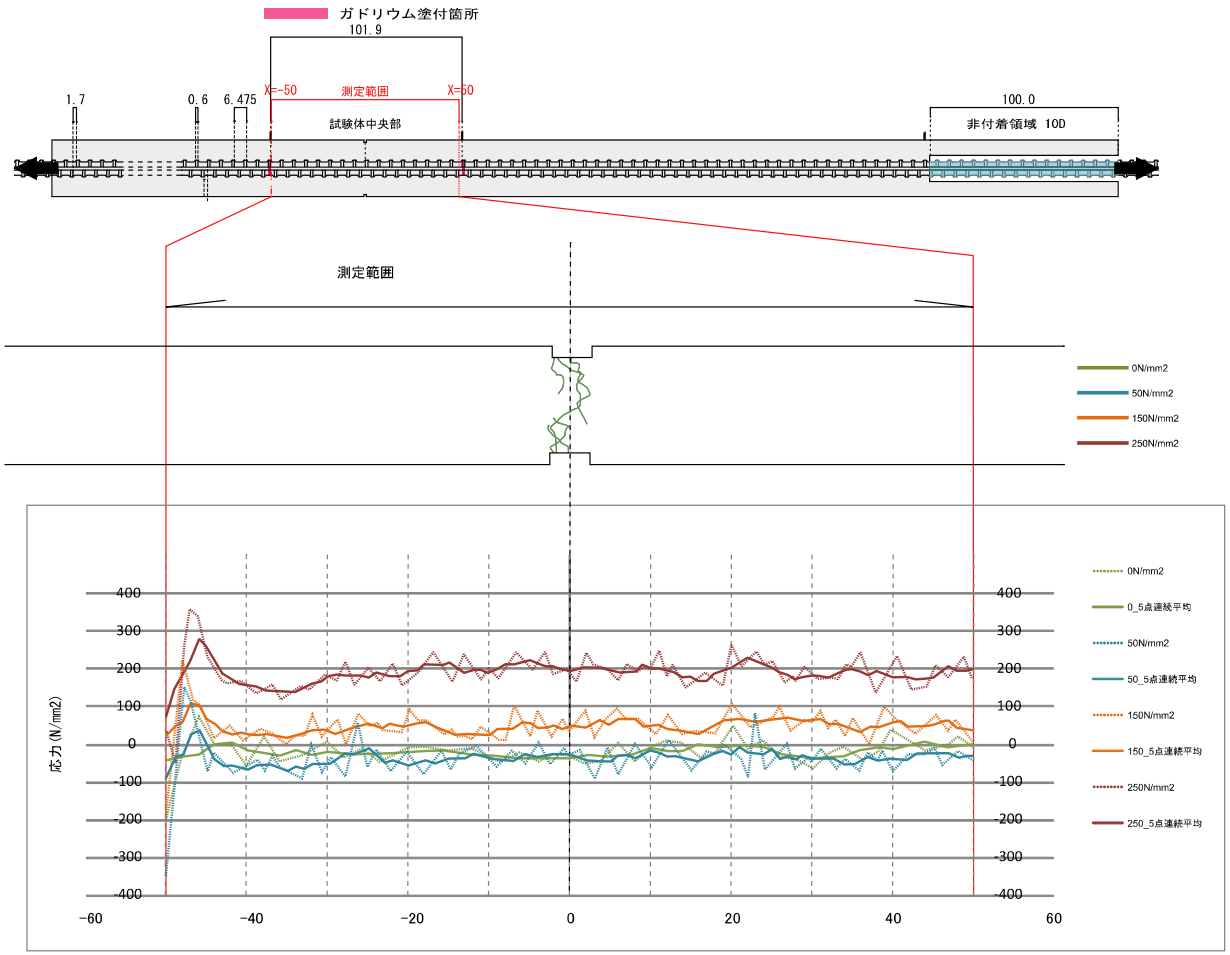


図１２　測定Ｉ結果（2009 年 3 月実施）

３．３　試験体端部の付着応力分布測定結果

測定結果を図１３に示す。点線は各応力状態の回折角より算定した応力を示しており、実線はその連続した近傍 5 点の平均を示している。

各応力において全体の傾向として、定着端部に向けて応力が上昇している様子がわかる。これは、試験体端部にむけて鉄筋の応力負担分が増加しているものと考えられ、試験体端部に 10D(100mm)の非付着領域を設けたことにより、試験体端部において鉄筋とコンクリートの応力伝達がスムーズに行われているため緩やかな上昇となったものと考えられる。また、中央部にひび割れが発生していたため、中央部に向けても緩やかに上昇している様子がうかがえる。

また、X=70mm 付近に注目すると、X=70mm 付近では応力状態が急激に上昇した。90 N/mm^2 載荷時には 50 N/mm^2 程度であった鉄筋の応力負担が 150 N/mm^2 では 170 N/mm^2 程度まで上昇している。しかし、60 N/mm^2 および 90 N/mm^2 では凹凸が逆転しており、この原因として、内部のひび割れ状況と外部からのひび割れ観察状況が一致していない可能性があると思われる。このことより、今後は、内部の微細なひび割れ状況の把握が望まれる。

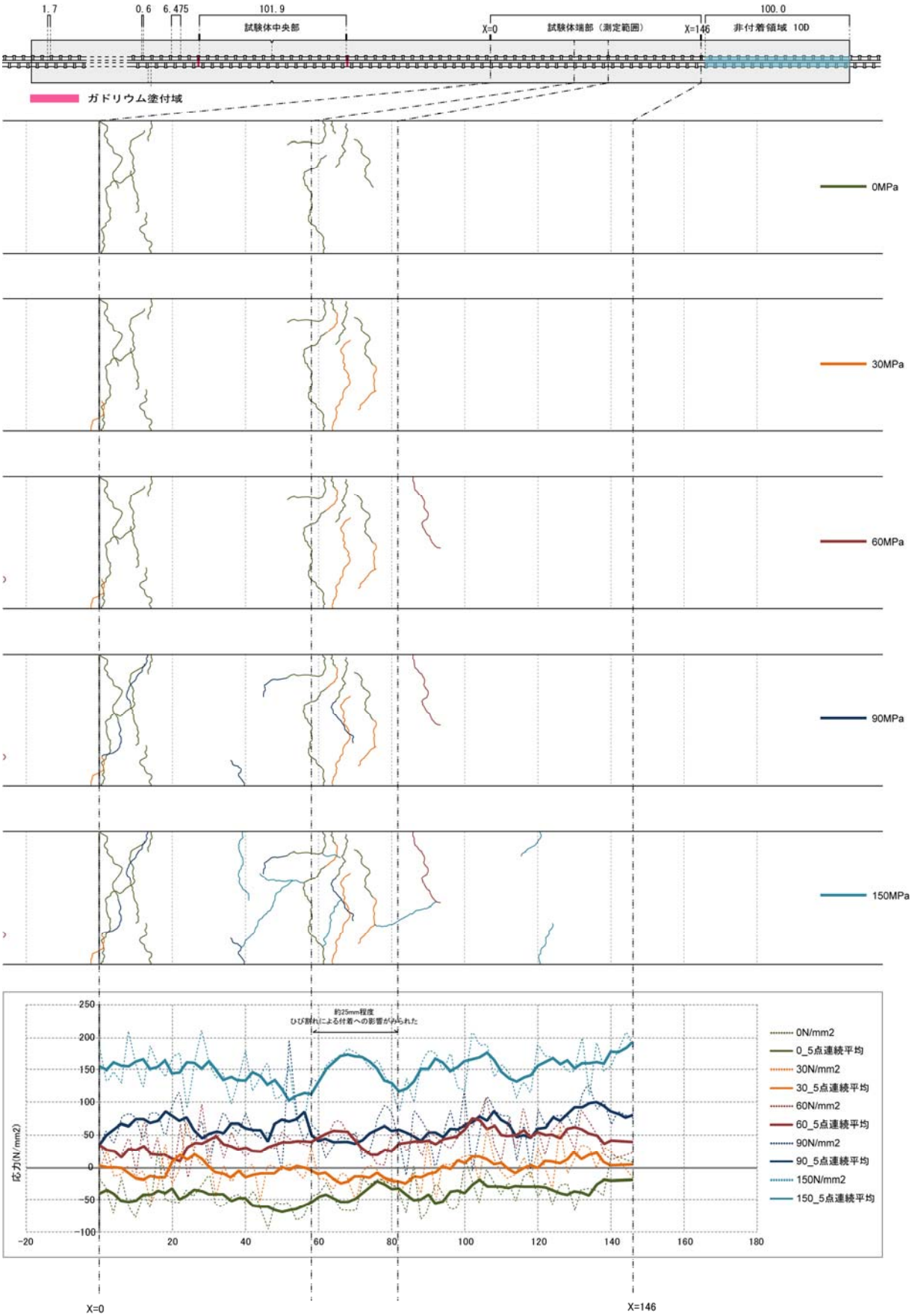


図１３　試験体端部における（2009 年 3 月実施）ひび割れの進展状況と応力分布

４．結論・考察

■RESAによる鉄筋コンクリート用棒鋼の応力測定を実施した結果、以下の知見を得た。

(1) RESAによる測定誤差について検討した。同じ点を6回測定した結果から、0N/mm^{2}で標準偏差が応力換算で15 N/mm^2、0N/mm^{2}で標準偏差が25N/mm^{2}程度であった。

(2)フィッティング誤差は応力換算で5 N/mm^{2}程度であった。

(3)材料の品質の場所による差異は、本測定の範囲では、(1)の誤差と同程度であり、有意な差は確認されなかった。この点についてはさらなる検討を要する。

■RESAによりコンクリート中の鉄筋付着について、ひび割れ近傍および端部定着部における付着応力分布の実測を実施、以下の知見を得た。

（1）　中性子回折残留応力解析装置を用いて鉄筋コンクリート中の鉄筋応力の測定を行った結果、鉄筋応力分布が応力レベルごとに変化する様を測定することに成功した。

（２）　その結果、鉄筋の負担応力が付着損失域に向けて緩やかに上昇する箇所と約30mm程度の山形に突出する箇所があることがわかった。これは、ひび割れの進展に伴い鉄筋応力負担が増加した傾向を捉えたものであるが、既往の文献などに比して応力分布が狭い結果となり、現象把握のための基礎的情報を得ることができた。

５．引用(参照)文献等

1) 兼松学，野口貴文，安田正雪，鈴木裕士：残留応力解析用中性子回折装置(RESA)による鉄筋応力の非破壊測定，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.2，pp.775-780，2008

2)楠浩一，椛山健二，向井智久，鈴木裕士：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，2008