

論文 中性化した試験体を用いた中性子回折法による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・畠中 雄一*4

要旨: 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。昨年度の実験では、試験体中の水素原子の量が多く、計測精度が低かった。そこで本研究では、試験体を中性化後、乾燥炉において絶乾状態にすることにより、試験体内の水素原子を可能な限り低減した試験体を作成し、中性子を用いて鉄筋の付着応力度を計測した。さらに、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, 中性化

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。そこで筆者らは、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してきた。昨年度は、早強コンクリートを用いた試験体で材齢が若く、水分量が多いため試験体中の水素原子が多かった。水素原子は中性子の進行を阻害するため、計測結果の精度は決して高くはなく、明瞭な付着特性を計測結果から見出すことは困難であった¹⁾。そこで本実験では、昨年度試験体を中性化し、さらに絶乾にすることで水素原子量を可能な限り低減し、再度 RESA を用いて計測を行った。

ら原子は、多数の平行な面に属していると考えられることができる。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。

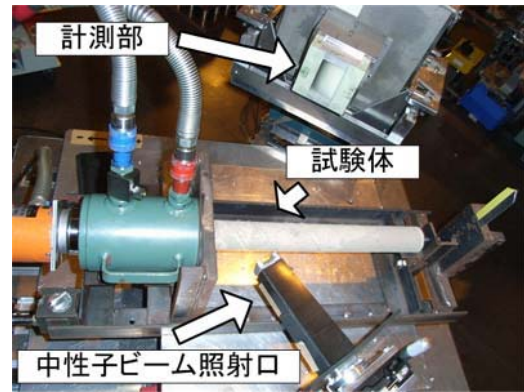


写真-1 RESA装置概要(俯瞰写真)

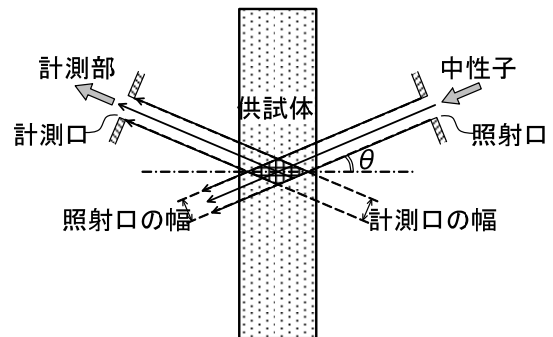


図-1 計測方法の概要

2. 中性子応力測定の概要^{1), 2)}

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

*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 横浜国立大学 技術部 技術職員 学士(工) (非会員)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 n を回折次数、 d を格子面間隔、 λ を入射 X 線の波長とする。また、 θ はブラッグ角と呼ばれ、ブラッグ角を2倍した 2θ を回折角と称する(図-1参照)。

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 Δd だけ大きくなる。この d の変化は、式(1)を θ 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、その関係式は次式で表される。

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

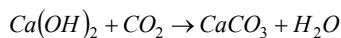
すなわち、回折角 2θ の変化を測定することで格子ひずみを評価することが可能となる。なお、ここで得られる格子ひずみは弾性ひずみを示している。

3. 試験体と加力・計測計画

3.1 試験体概要

試験体および加力治具を図-2に示す。試験体部分は、直径50mm、長さ400mmの円柱形で、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。定着長さは、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^{3)~6)}。コンクリートの呼び強度は36N/mm²で、骨材の最大寸法は、20mmで配合したが、10mm以上は打設前にふるいにより除去した。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のねじ鉄筋をD10に溶接した。

昨年度実験結果から、コンクリート中の主として水素原子の量を低減することが必要であることがわかった⁷⁾。そこで、コンクリートの化学反応



により、コンクリートを中性化し、分離した水分を乾燥させることにより、試験体外に放出させる。これにより、水素原子を減らした試験体を用意し、再度計測することを考える。中性化は、中性化促進装置により行った。

本試験体作成方法の有効性を確認するため、4つの試験体を用意し、それぞれ異なる養生を行った後に、中性子の透過強度を計測した。

試験体は、次の4つの方法で養生を行った。養生ごとの試験体の重量変化を表-1に示す。

1. 試験体を材齢26日より材齢269日まで中性化試験室(気温20度、湿度60%)に保管し、その後材齢276日まで絶乾炉に移動し、材齢279日まで恒温恒湿炉(気温20度、湿度60%)に保管
2. 昨年実施時に用いた試験体を、大気中で放置
3. 試験体を材齢26日より材齢269日まで中性化試験室(気温20度、湿度60%)に保管し、その後材齢279日まで恒温恒湿炉(気温20度、湿度60%)に保管
4. 試験体を材齢26日より材齢279日まで恒温恒湿炉(気温20度、湿度60%)に保管

表-1 試験体の質量変化(g)

養生方法	材齢	材齢	材齢	材齢
	26日	175日	269日	278日
1	3884.8	3948.7	3965.0	3887.7
3	3902.8	3959.5	3953.8	3964.9
4	3900.5	3867.5	3870.5	3871.4

3.2 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-2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。

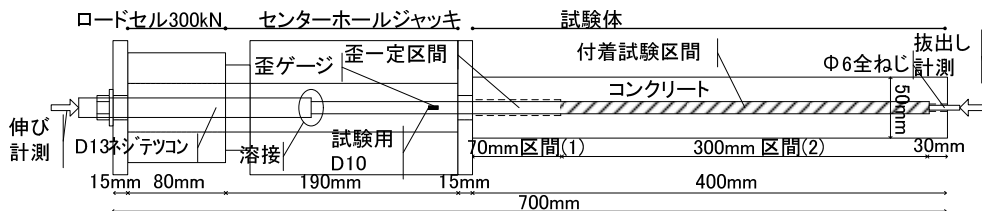


図-2 試験体概要

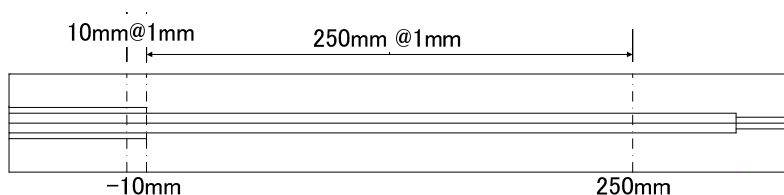


図-3 鉄筋の応力計測位置

RESA での計測に先立ち、同様の試験体を、図-2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。RESA での計測は、まず応力を 250N/mm^2 として約2時間放置してクリープを発生させ、その後 200N/mm^2 の応力で計測を行った。更に、 0N/mm^2 の応力で計測を行った。実験は、2008年7月25日(材齢279日)10時より28日9時までの71時間において、東海村原子力研究開発機構で行われた。

3.3 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き出し量は、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 $\alpha\text{Fe}(110)$ の格子ひずみ変化を測定した。中性子線の回折角 2θ は約 56° である。中性子線の経路は図-4に示すようになる。本測定では、図-3に示すように、おおよそ“ $6.4\text{mm} \times 3.4\text{mm}$ (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-2に示した区間(1)および区間(2)において、図-3に示したように付着なし領域の 10mm と、定着領域の 250mm の合計 260mm を、 1mm 刻みで計測した。中性子線による1点の計測は、10分で繰り返し数は1回としたため、コンクリートのクリープ等の影響を考慮して、各点での計測時には、ひずみおよび荷重も計測した。制御に用いるロードセルの出力は、規格上は 0.1kN 刻みの計測が可能である。鉄筋に導入した応力は、 200N/mm^2 、 0N/mm^2 の2種類である。

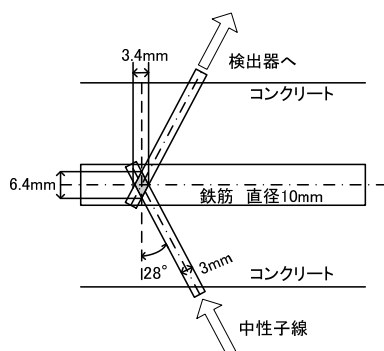


図-4 中性子線の経路(塗りつぶし部分が測定領域)

また、 0N/mm^2 での回折角をより正確に計測するため、 0N/mm^2 での計測に際して、付着なし領域の3点(付着開始点より8, 9, 10mm での点)で、それぞれ30分計測を行った。その後、付着開始点より 100mm の点まで 1mm 刻みに101

点、各点10分で計測を行った。

4. 実験結果とその考察

4.1 中性子線の透過強度

材齢の若いコンクリートを用いた場合、試験体中の水分が多く特にその中の水素原子が中性子の透過を阻害することが考えられる。そこで、3.1節で示した養生方法の異なる試験体に対して、中性子の透過強度を計測した。透過強度とは、図-5に示すように、試験体の軸方向と直交方向に中性子を照射し、試験体を透過してくる中性子の強度(count/minute)を計測するものである。

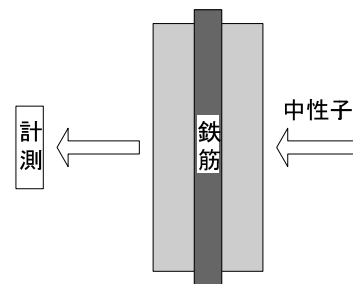


図-5 透過強度の計測方法

図-6に、各試験体の透過強度を示す。図から、養生方法1の試験体は、他の試験体に比べて、5倍以上の透過強度があることが分かる。また、養生方法2~4では、透過強度に大きな差はなかった。よって、試験体は中性化後、絶乾状態にすることが良いといえる。なお、中性化により水素原子を水化して、その後絶乾状態により水分を飛ばした効果は、中性化を行わずに絶乾状態にした試験体がないため、不明である。

透過強度が非常に高くなった絶乾試験体をRESA計測の対象とした。同一養生条件で保管した2本のテストピースを用いて圧縮試験を実施した結果、最大圧縮応力度は 63.3N/mm^2 、 64.3N/mm^2 、平均は 63.8N/mm^2 であった。

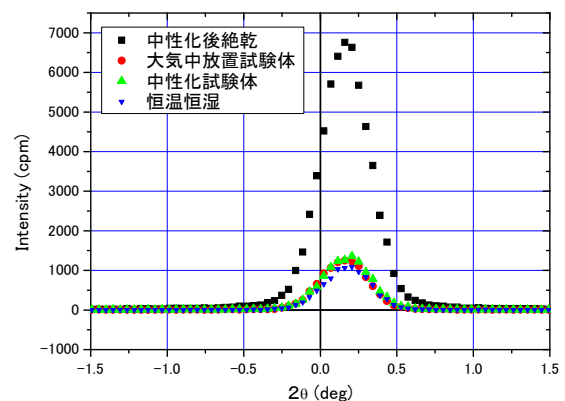


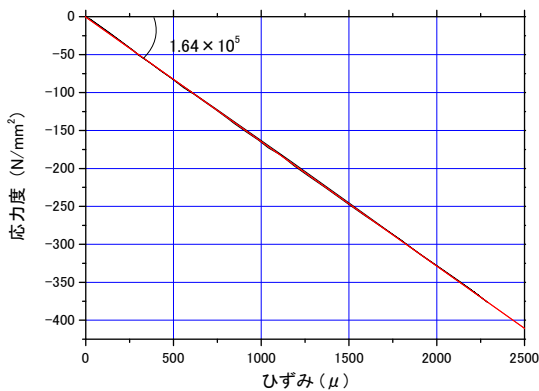
図-6 試験体の養生の方法と透過強度の関係

4.2 事前加力試験結果

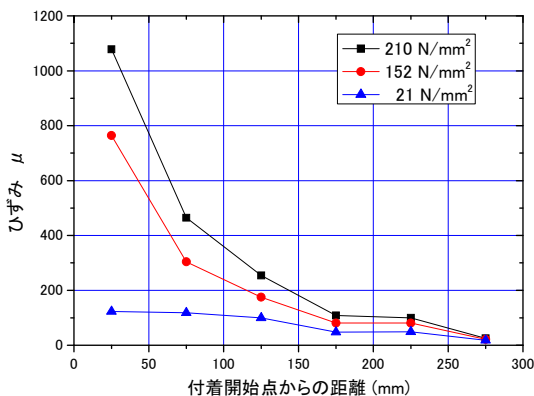
RESA での計測に先立ち、試験体の強度を確認するための加力を実施した。試験体は養生 1 と同じく、中性化の後に絶乾としたもので、区間(2)に 50mm 間隔で一对のひずみゲージを鉄筋表面に貼付してある。加力中には、鉄筋の引張降伏後もコンクリート部分に損傷は生じなかった。

両試験体の応力度－ひずみ関係の一部を図－7 に示す。ここで、応力度は、図－2 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^2 で除した値である。同じくひずみとは、図－2 に示したコンクリート外のひずみゲージの値である。ヤング係数は $1.64 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ となった。

図－8 に、定着部分のひずみ計測値を示す。ひずみは、図－2 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、後述する RESA での導入時応力 (205.9N/mm^2) に近い 210N/mm^2 時、実験終了時応力 (154.4N/mm^2) に近い 152N/mm^2 時、および応力が十分低い状態の参考値として 21N/mm^2 時に計測されたひずみを示している。引張力導入時である 210N/mm^2 、 152N/mm^2 では、定着長で 75mm 付近までの傾きが高く、



図－7 事前実験結果の応力度－ひずみ関係



図－8 鉄筋のひずみ分布（ひずみゲージ付試験体）

その後緩やかになるものの、175mm 程度までひずみが生じており、225mm の点でも 100μ 程度のひずみが観測された。

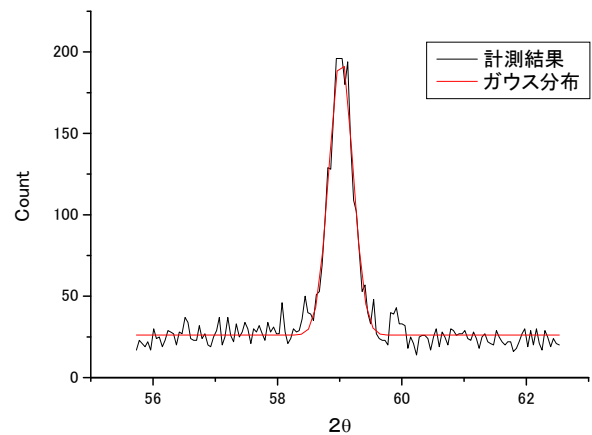
4.3 RESA による計測結果

図－9 に RESA による計測結果の一例を示す。昨年度の結果¹⁾と異なって、ピークの値は高く、また相対的にバックグラウンドも低い。その為、Wavelet 変換等を用いなくとも十分な精度を有していると判断して、全ての点での計測結果を直接 Gauss 分布に近似して、ピークでの 2θ を計測した。

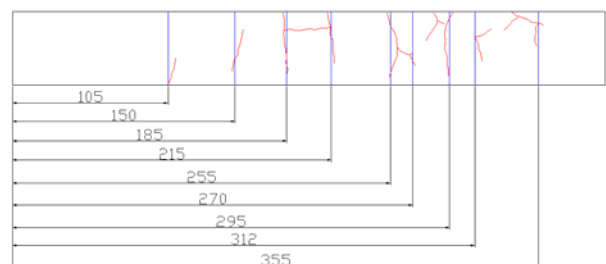
(3)式から、鉄筋の弾性ひずみ分が計算される。ここで、 $2\theta_0$ は無負荷時の回折ピーク強度での回折角である。また、(3)式を用いて求めた弾性ひずみ ε に、110 回折のヤング係数 $E (= 2.25 \times 10^5)$ をかけて応力を算出する。ここで、 $2\theta_0$ は、 0N/mm^2 で付着なし領域で計測された 3 点の回折角 (59.083 度, 59.089 度, 59.081 度) の平均値 59.084 度を用いた。

$$\varepsilon = -\frac{2\theta - 2\theta_0}{2} \frac{1}{\tan(2\theta_0/2)} \quad (3)$$

軸力導入前に観察したひび割れ図を図－10 に示す。乾燥収縮によるものと見られるひび割れが散見された。



図－9 計測結果の一例



図－10 試験体のひび割れ図（単位 mm）

図-11 に、RESA で計測中に間隔1分間でインターバル測定した導入応力の推移を示す。205.876N/mm²の導入力で計測をスタートしたが、クリープにより導入力は低下し、最終的には154.407N/mm²となった。

図-12 および図-13 にそれぞれ、205.876N/mm²導入時および0N/mm²での計測結果から求めた各地点での鉄筋の応力を示す。図中には、観測されたひび割れ図も併せて示している。鉄筋の付着域で鉄筋の応力が低下していることが分かる。また、40N/mm²程度の幅のふらつきがあることも分かる。

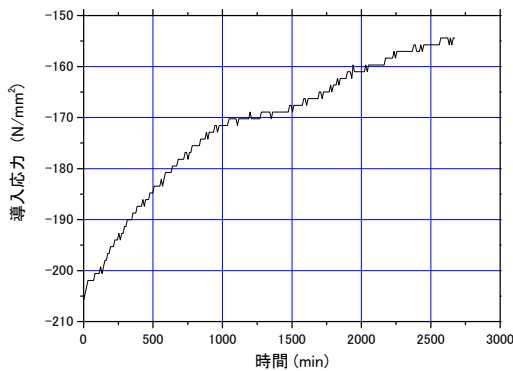


図-11 ロードセルによる応力度の推移

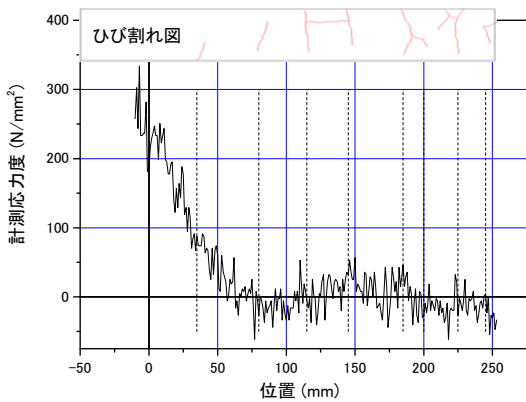


図-12 算出した応力度 (200N/mm²)

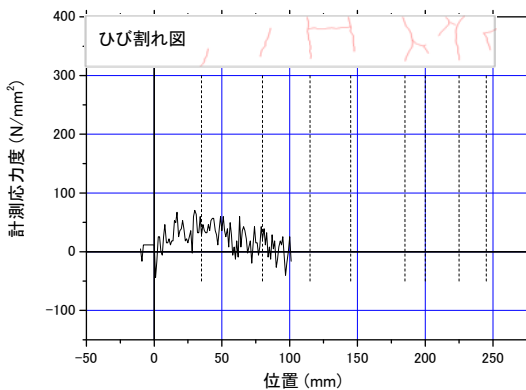


図-13 算出した応力度 (0N/mm²)

計測結果から、40N/mm²程度の幅のふらつきを分離して定着長さの傾向を検討するために、計測結果の Wavelet 変換を試みた。変換では、1mm 刻みの計測応力を 1sec 刻みの時刻歴データと考えて、Wavelet 変換を適用した⁷⁾。その為、分解された各ランクとナイキスト周波数および周期の関係は、表-2のようになる。観測記録から rank 1 の成分 (g₁ 成分、主成分の周期 T=4mm) を除去した F1, g₁ および rank 2 である g₂ 成分 (T=8mm) を除去した F2, g₁~g₃ 成分 (T=16mm) を除去した F3 を図-14 に示す。除去成分を増やすに従って、ふらつきの影響が少なくなり、F3 で殆どふらつきが無くなる事が分かる。図-15 には F3 成分のみを示している。定着長さは 75mm であったことが分かる。また、一部圧縮応力が作用しているところがあるが、これは、乾燥収縮の影響と思われる。また、ひび割れ図との比較から、ひび割れ近傍で応力が低下しており、ひび割れ部で応力が解放されていることが分かる。なお、横軸が負の付着一定領域で応力が低下しているが、これは値が0から始まらない事による Wavelet 変換上の問題である。

g₁, g₂, g₃ 成分および g₁ 成分と g₂ 成分の和を図-16 に示す。図から、40N/mm²程度の幅のふらつき部分に有意な周期性は認められなかった。

表-2 各分解ランクと Nyquist 周波数

Rank	Num. Of Data	Δt	Nyquist	T
0	1	1		
1	2	2	0.25	4
2	4	4	0.125	8
3	8	8	0.0625	16
4	16	16	0.03125	32
5	32	32	0.015625	64
6	64	64	0.007813	128
7	128	128	0.003906	256
8	256	256	0.001953	512

Δt : 刻み長さ, T : 周期

以上のように、絶乾にした試験体を用いた鉄筋の応力計測から、主筋の応力が 205.876N/mm² では定着長が 75mm であることが分かった。図-8 に示す結果は、75mm に比べて長い、これはひずみゲージのリード線が付着を低下させたためと思われる。D10 の公称断面積が 71mm²、周長が 30mm であることから、鉄筋の平均付着応力度 τ は、

$$\tau = \frac{205.876 \text{ N/mm}^2 \times 71 \text{ mm}^2}{30 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}} = 6.50 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

であることが分かった。コンクリートの圧縮強度が

63.8N/mm²であったので、

$$\frac{\tau}{F_c} = \frac{6.50 \text{ N/mm}^2}{63.8 \text{ N/mm}^2} = 0.102 \quad (5)$$

であった。なお、加力中に導入応力度は 205.876N/mm²から 154.407N/mm²に低下した。応力度として 154.407N/mm²を用いた場合は、 $\tau = 4.87 \text{ N/mm}^2$ 、

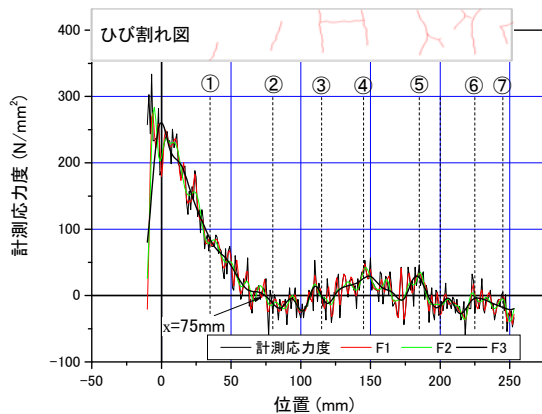


図-14 計測された応力とひび割れの関係

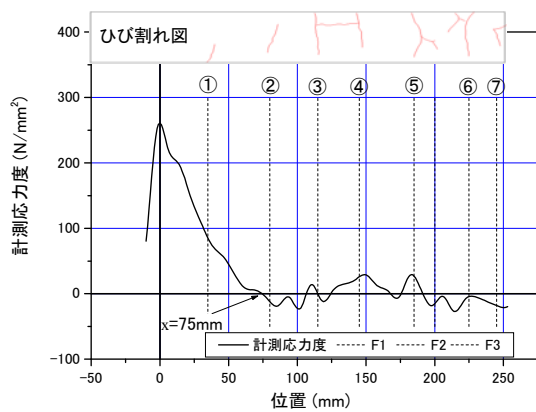


図-15 計測された応力とひび割れの関係 (F3成分)

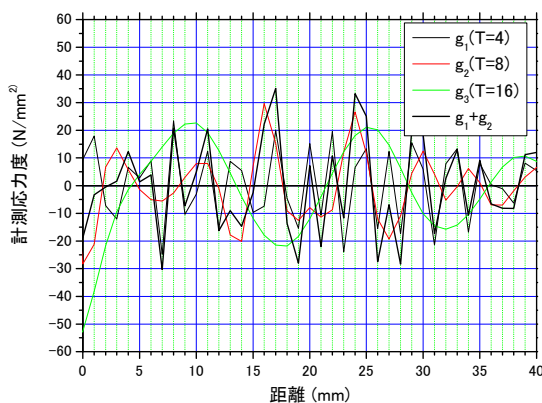


図-16 g₁, g₂, g₃成分

$\tau/F_c = 0.073$ となった。

5. 終わりに

鉄筋の付着応力度分布を検討するために、中性子回折法を用いて実験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 中性子の透過強度を増すためには、試験体を中性化した後に、絶乾状態とするのが良い。それにより、大気中に養生した試験体の5倍程度の中性子透過強度を得た。
- 本実験から得られたD10の定着長さは約75mmであった。
- 本実験から得られた平均付着応力度は6.5 N/mm²であった。また、平均付着応力度のコンクリート圧縮強度に対する比は、0.102であった。

謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構の平成20年度(上期)施設共用利用課題(課題番号 2008A-A26)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、鈴木裕士 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 名古屋大学准教授のメンバーで実施された。

参考文献

- 1) 楠 浩一, 椋山健二, 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, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.30., No.3, pp.649-654, 2008
- 2) 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, ふえらむ, Vol. 11, No. 11, pp.9-16, 2006
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造計算規準・同解説, 1991
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造計算規準・同解説 1999, 1999
- 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 第一報, 日本建築学会論文報告集, 第 319号, pp.47-54, 1982.9
- 6) 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
- 7) 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