

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

楠 浩一*1・梶山 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、材料に照射して回折角を測ることにより、材料の弾性ひずみ量を非接触で計測できることが知られている。この中性子による非接触計測技術である中性子回折法を利用して、コンクリート内部における鉄筋の応力伝達メカニズムの解明が期待される。本研究では、鉄筋または接着系あと施工アンカーをコンクリートに埋め込んだ後に中性化させた小型の試験体を対象とする。鋼製バネを組み込んだ加力治具によって試験体に一定の導入力を与えながら、中性子回折法を適用して、コンクリート内部の鉄筋の引張応力度を計測し、その分布性状を把握・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活かすことで、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^{1), 2), 3)}。文献 2) では、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することで、RESA を用いて精度良く鉄筋の引張力分布を計測出来ることを明らかにした²⁾。しかし、コンクリートのクリープ現象により、計測中に鉄筋の導入力が低下し、一定応力下での鉄筋の引張応力度分布を計測することが出来なかった。そこで本論文では、引張力導入部に鋼製バネを配して応力を一定に保てるように改良した加力装置による計測結果を検討した。また、接着系アンカーを用いたあと施工アンカーの引張応力度分布についても同様に計測を行った。

2. 中性子応力測定の概要⁴⁾

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

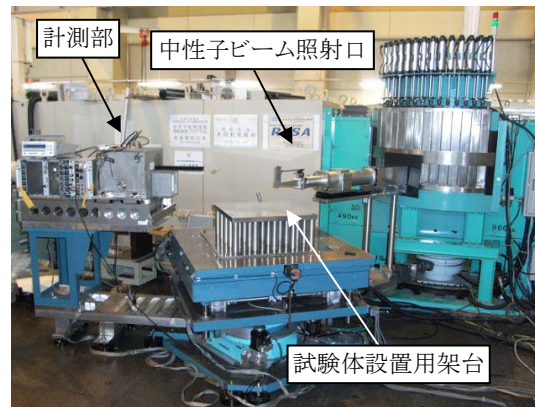


写真-1 RESA装置概要

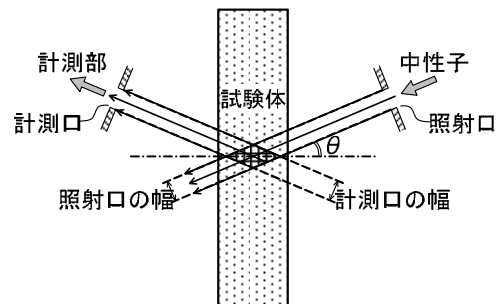


図-1 計測方法の概要

*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 国際地震工学センター 主任研究員 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)

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、それらの散乱線が同位相になって相互に干渉し回折現象を生じる。

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

ここで、 n を回折次数、 d を格子面間隔、 λ を入射中性子線の波長とする。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。

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

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

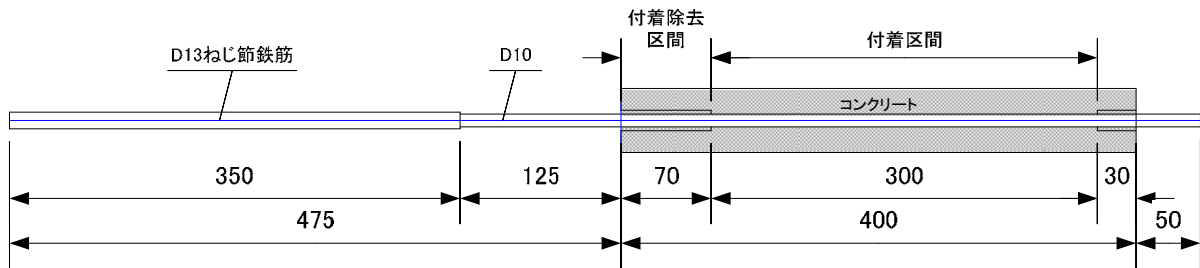
格子ひずみは弾性ひずみを示している。

3. 試験体と加力・計測計画

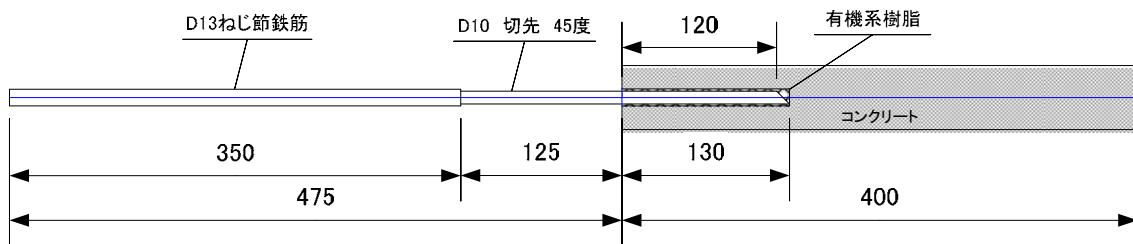
3.1 試験体概要

試験体を図-2に、加力治具を図-3に示す。コンクリート部分は、直径50mm、長さ400mmの円柱形である。付着試験体(図-2(a))は、中央にD10の鉄筋が埋設されている。コンクリートの導入力側の端部には定着を除去したひずみ一定区間を70mm設けた。定着長は文献^{5), 6)}を参照し300mmとした。あと施工アンカー試験体(図-2(b))は、円柱形コンクリートに内径13mm、深さ130mmの孔をあと施工で設け、接着系アンカーとしてD10の鉄筋を120mm埋め込んだ。両試験体とも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。

コンクリートの調合強度は34.5N/mm²で、骨材の最大寸法は、10mmで調合した。コンクリートの調合表を表



(a) 付着試験体



(b) あと施工アンカー試験体

図-2 試験体概要

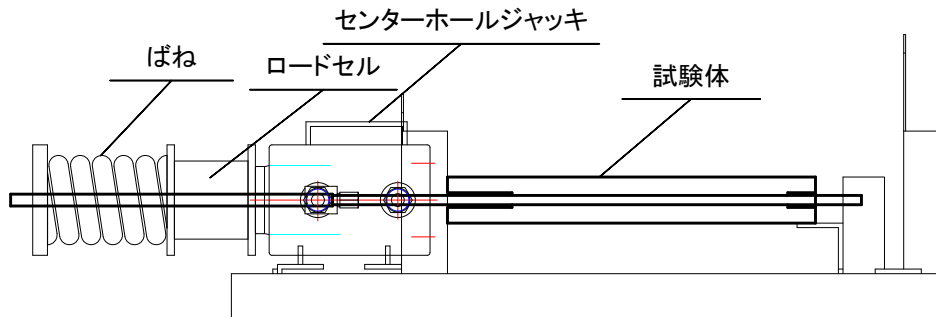


図-3 試験体と加力治具

ー1に、材齢28日での材料試験結果を表ー2に示す。付着試験体は、材齢9日～24日まで促進中性化を行い、材齢25日～31日まで乾燥炉で乾燥させた。あと施工アンカー試験体は、材齢8日に削孔し、促進中性化の後に、材齢25日～29日で乾燥を行い、その後アンカー筋の打設を行った。あと施工アンカー試験体に用いたカプセル型の有機系樹脂は一般に用いられるもので、その主成分は、ビスフェノールA型エポキシメタクリレート樹脂10～40(Wt%)、スチレン8～12(Wt%)、過酸化ベンゾイル0～10(Wt%)、および硫酸カルシウム(石膏)0～10(Wt%)である。

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、図ー2に示すセンターホールジャッキを用いた。鉄筋に導入した目標応力(以下、目標導入応力)は、付着試験体ではクリープの影響をなるべく取り除くため、250N/mm²、125N/mm²、20N/mm²の順に3種類、あと施工アンカー試験体では実験時間の都合で250N/mm²の1種類である。

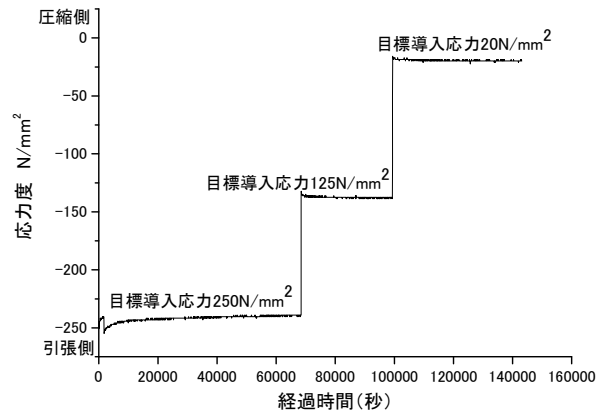
鉄筋の作用応力を一定に保つため、材料寸法φ21mm、コイル中心径76mm、長さ130mm、ばね定数1245N/mmの鋼製コイルばねを挟んだ。実験は、2009年3月3日(材齢31日)10時より6日9時までの71時間において、東海村原子力研究開発機構で行われた。

図ー4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。応力導入部にばねを用いたため、ほぼ一定の応力が作用していることが分かる。付着試験体で250N/mm²を目指した導入力では加力終了時点(以下、実測導入応力)で240N/mm²、125N/mm²を目指した導入力では実測導入応力は138N/mm²、20N/mm²を目指した導入力では実測導入応力は18N/mm²、あと施工アンカー試験体で250N/mm²を目指した導入力では実測導入応力は233N/mm²であった。

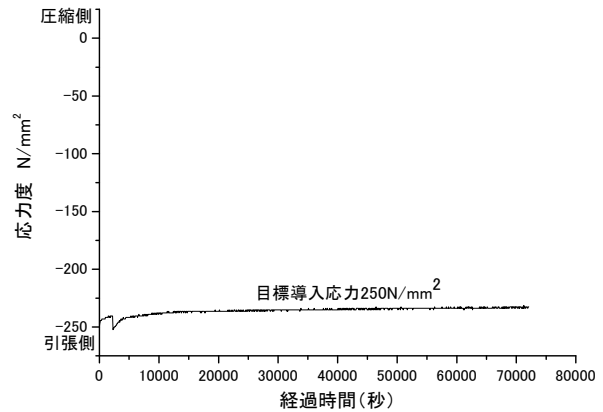
3.3 計測方法

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。中性子線の回折角2θは約56度である。スリットの大きさは3×15mm、ラ

ジアルコリメーターは3mm、波長は2Åとした。中性子線の経路は図ー5に示すようになる。本測定では、図ー5



(a) 付着試験体



(b) あと施工アンカー試験体

図ー4 ロードセルによる応力度の推移

表ー1 コンクリートの調合表

調合強度	スランプレ	空気量	水セメント比	粗骨材の最大寸法	細骨材率	単位水量	単位質量 (kg/m ³)			混和剤 標準形(I種) 減水剤
							セメント	細骨材	粗骨材	
N/mm ²	cm	%	%	mm	%	kg/m ³				
34.5	18	4.0	60.0	10	49.0	185	308	859	914	

表ー2 材齢28日でのコンクリートの材料強度等

供試体 No.	養生方法	供試体の諸元			圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度平均 (N/mm ²)
		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)		
1	水中	99.5	198.8	3613.6	43.1	41.4
2		100.5	199.0	3647.6	40.7	
3		99.8	196.0	3592.7	40.3	
1	水中 (3日間) → 気乾	100.0	197.7	3493.8	40.9	42.0
2		100.5	198.3	3555.1	44.2	
3		99.9	198.3	3555.1	41.0	

に示すように、おおよそ“6.4mm×3.4mm（長さ方向）”の領域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。ひずみ測定点は、付着試験体では付着なし区間2mm（目標導入応力 250N/mm²のみ 10mm）と付着あり区間約 120mm を、目標導入応力 250N/mm²では 1mm 刻みで、125N/mm²、20N/mm²では 2mm 刻みで計測した。各点での計測時間は 8 分とした。あと施工アンカー試験体では、端部から 130mm 分を 2mm 刻みで、各計測点は、樹脂の中性子透過性が良くないことを考慮して、計測時間を 20 分とした。

図-6 に RESA による計測結果の一例を示す。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、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。

鉄筋の弾性ひずみ分は式(2)を用いて計算される。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、式(2)を用いて求めた弾性ひずみ ϵ に、110 回折のヤング係数 $E (=2.25 \times 10^5 \text{ N/mm}^2)$ を乗じて応力度を算

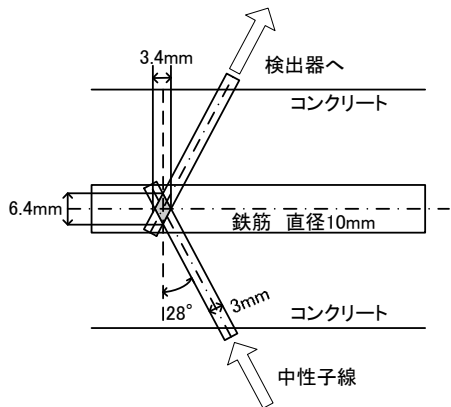


図-5 中性子線の経路
(塗りつぶし部分が測定領域)

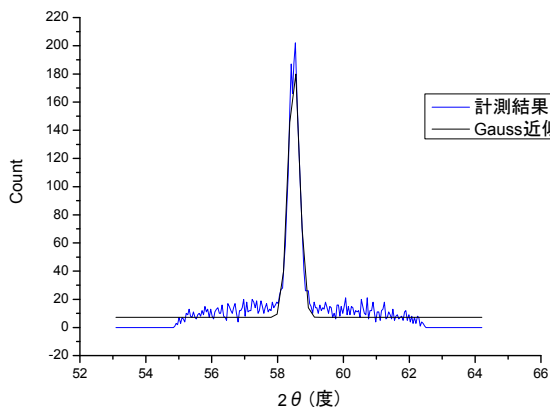


図-6 計測結果の一例

出する。ここで、 $2\theta_0$ は、同一ロットの鉄筋について無負荷な状態で 2 点を 30 分間計測し、その後、位置を 1mm ずつずらしながら 3 点を各 10 分計測したときの回折角（58.533 度、58.544 度、58.542 度、58.536 度、58.530 度）の平均値 58.537 度を用いた。

4. 実験結果とその考察

図-7～図-9 に付着試験体でそれぞれ、目標導入応力 250N/mm²、125N/mm²、および 20N/mm² での計測結果から求めた各測定点での鉄筋の引張応力度を示す。また、図-10 にあと施工アンカー試験体で目標導入応力 250N/mm² での計測結果から求めた各測定点での鉄筋の引張応力度を示す。鉄筋の付着域で距離に応じて引張応力度が低下していることが分かる。また、40N/mm² 程度の幅のばらつきがあることも分かる。これは、骨材とセメント部の中性子吸収率の差と、骨材の分散状態の影響によるものと考えられる。

付着試験体の目標導入応力 125N/mm² の試験体の場合では、およそ 50mm まで引張応力度がほぼ一定、つまり付着力がほぼ 0 となっている区間がある。これは、目標導入応力 250N/mm² を最初に導入したため、この 50mm の区間で徐々に付着が失われたと考えられる。なお、計測は付着開始区間から実施したため、目標導入応力 250N/mm² 加力時には比較的早い段階で計測が行われた区間であり、図-7 では当該区間における付着喪失傾向は見受けられなかった。20N/mm² 導入時には、端部での引張力計測値は、実測導入応力と一致していないが、250N/mm² および 125N/mm² 導入時には、端部での引張力計測値は実測導入応力と良好に一致している。

あと施工アンカー試験体では、端部での引張力計測値が導入力を下回っている。これは、樹脂による中性子透過率の低下や樹脂部への引張応力の伝達、アンカー打設精度等の影響が考えられるが、今後の検討が必要である。定着長についても、付着試験体よりも短く見受けられる。

計測結果から、40N/mm² 程度の幅のば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^{1),2),7)}を試みた。変換では、1mm の長さを 1sec 刻みの時刻歴データと見なして、Wavelet 変換を適用した。そのため、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-3 のようになる。観測記録からランク 1～3 の成分 (T=4～16mm) を除去した結果を図-11 に示す。なお、実際には応力導入側の端部の応力値は 0 ではないが、Wavelet 変換の特性から、一部成分を除去したために、応力導入側の端部近傍で 0 点を指向する傾向を示している。

図-11 より、付着試験体では、目標導入応力 250N/mm² 導入時には定着長がおおよそ 100mm であること、目標導

入応力 125N/mm^2 導入時では、およそ 50mm を超えたところから、 250N/mm^2 導入時と同じ曲線となっていることが分かる。これは、導入応力が異なっても、等しい平均付着応力度を示していることとなる。目標導入応力 20N/mm^2 導入時では、ばらつきの方が大きく、引張力がほぼ 0 付近となっている。

一方、あと施工アンカー試験体では、 $0\sim 20\text{mm}$ 付近までは Wavelet 変換で一部成分を除去した影響が大きく見受けられるが、 20mm 以降に注目すると、およそ 72mm

付近で引張応力が 0 となっていることが分かる。

付着試験体で目標導入応力 250N/mm^2 導入時の $20\text{mm}\sim 80\text{mm}$ 間のランク 1~3 の成分を図-12 に示す。図から、 40N/mm^2 程度の幅のばらつき部分に、節の影響（節間隔 6mm ）等の有意な周期性は認められなかった。その為、このばらつきは骨材等の影響で、図-6 に示すピークプロファイルが不安定になった為と考えられる。

以上のように、付着試験体の鉄筋の引張応力計測から、主筋の実測導入応力が 240N/mm^2 では定着長が約 100mm

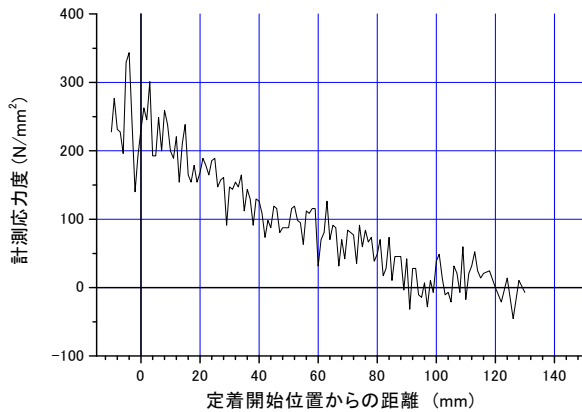


図-7 算出した応力度（目標導入応力 250N/mm^2 ）

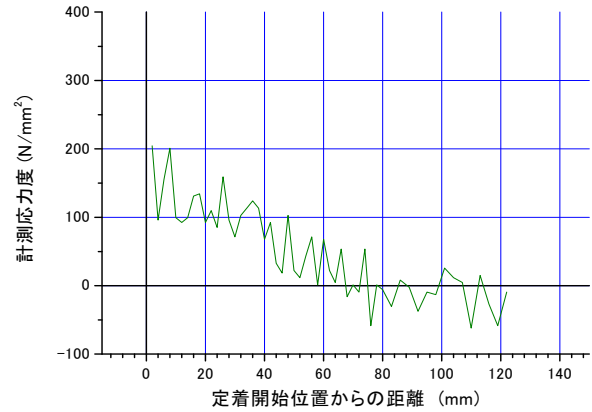


図-10 算出した応力度（あと施工アンカー試験体、目標導入応力 250N/mm^2 ）

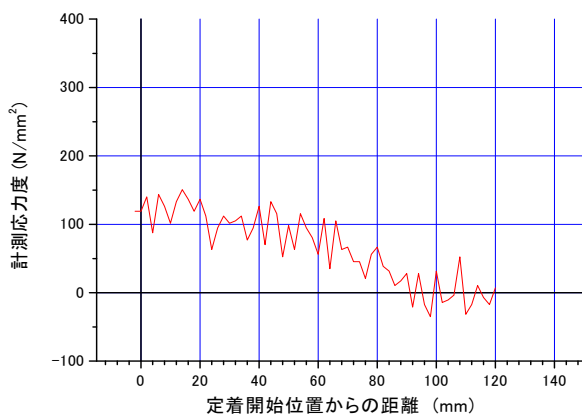


図-8 算出した応力度（目標導入応力 125N/mm^2 ）

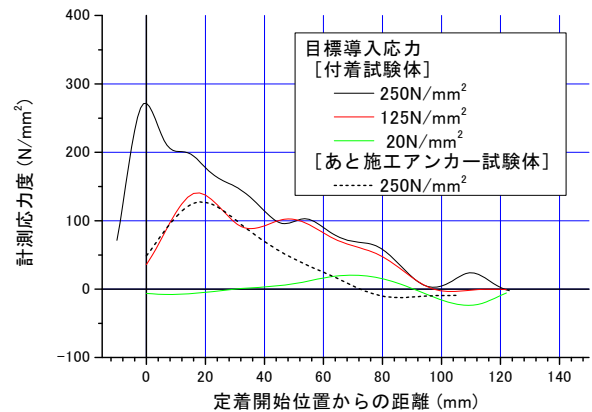


図-11 計測された応力(ランク 1~3 成分を除去)

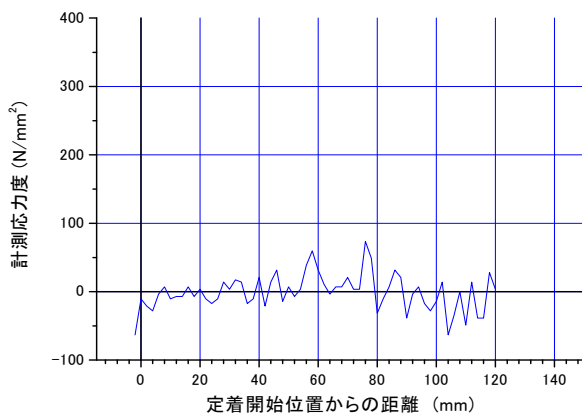


図-9 算出した応力度（目標導入応力 20N/mm^2 ）

表-3 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	0.01562	64
6	64	64	0.00781	128
7	128	128	0.00390	256
8	256	256	0.00195	512

Δt : 刻み長さ, T : 周期

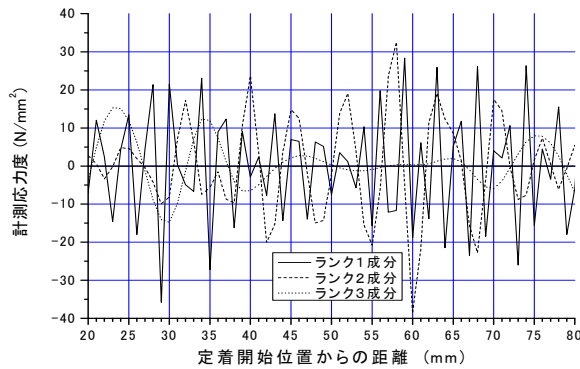


図-12 ランク 1~3 成分

であることが分かった。文献2)で示した結果は75mmであったが、これは加力中に導入応力が 205.9N/mm^2 から 154.4N/mm^2 に低下したためであったと考えられる。D10の公称断面積が 71mm^2 、周長が 30mm であることから、鉄筋とコンクリートの間の平均付着応力度 τ は、

$$\tau = \frac{240\text{N/mm}^2 \times 71\text{mm}^2}{30\text{mm} \times 100\text{mm}} = 5.68\text{N/mm}^2$$

となる。

また、あと施工アンカー試験体では、アンカー筋の実測導入応力 233N/mm^2 では定着長が 72mm であることが分かった。アンカー筋と周辺の接着剤との間の平均付着応力度 τ は、

$$\tau = \frac{233\text{N/mm}^2 \times 71\text{mm}^2}{30\text{mm} \times 72\text{mm}} = 7.66\text{N/mm}^2$$

となり、付着試験体よりも高い値となる。一方、図-11で 20mm 以遠を見ると、あと施工アンカー試験体と付着試験体の引張力の傾きは大きくは異なっていない。平均付着応力度があと施工アンカー試験体で大きくなったのは、特に付着開始点近傍の引張応力度分布の影響と考えられ、今後更に詳細に計測する必要がある。なお、アンカー用の削孔の径が 13mm のため、径を 13mm として接着剤とコンクリートの間の平均付着応力度を計算すると、

$$\tau = \frac{233\text{N/mm}^2 \times 71\text{mm}^2}{13\text{mm} \times \pi \times 72\text{mm}} = 5.63\text{N/mm}^2$$

となり、平均付着応力度は付着試験体の鉄筋とコンクリートの間の平均付着応力度ほぼ同じ値となる。

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。

- 試験体を中性化した後に、絶乾状態とすると中性子は良好に透過する。
- 鋼製バネを加力装置に組み込むことで、長時間にわたって導入力をほぼ一定に保持することが出来た。
- 導入軸力は異なっても鉄筋に作用する平均付着応力度は一定であり、 5.68N/mm^2 であった。
- 実測導入応力が 233N/mm^2 で、接着系アンカーを用いたあと施工アンカーの定着部における鉄筋と接着剤の平均付着応力度は 7.66N/mm^2 、コンクリートと接着剤の平均付着応力度は 5.63N/mm^2 となった。

謝辞

本研究は、日本原子力研究開発機構の平成20年度(下期)施設共用利用課題(課題番号 2008B-A06)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、あと施工アンカーの施工はサンコーテクノの酒井氏に、試験体の絶乾化は建築研究所濱崎氏にご協力いただいた。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, 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, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.649-654, 2008
- 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.31, No.2, pp.619-624, 2009
- 3) Hiroshi Suzuki, Manabu Kanematsu, and Koichi Kusunoki: Neutron diffraction studies on strain evaluation of rebar in reinforced concrete, Powder Diffraction, Volume 24, Issue S1, pp. S68-S71, 2009
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造計算規準・同解説, 1991
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造計算規準・同解説 1999, 1999
- 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