

# 中性子ビームを用いた鉄筋コンクリートの 付着性能評価

奥野功一<sup>\*1</sup>・田中聖一朗<sup>\*1</sup>

中性子ビームを用いた中性子回折法により、鉄筋とコンクリートとの付着性能測定に係る鉄筋応力度分布を測定した。試験体は普通強度コンクリートと高強度コンクリートを含む3水準で、J-PARC MLFにある工学材料回折装置にて実験を行った。その結果、中性子回折法を用いることでコンクリート強度によらず高精度で連続的に鉄筋応力度を測定することが可能であることがわかった。また、高強度コンクリートは低強度のコンクリートに比べ付着性能が高いことが中性子回折法でも確認できた。

キーワード：中性子、コンクリート、鉄筋、付着

## 1. 緒言

鉄筋コンクリートは、引張力に弱いコンクリートを鉄筋で補強することにより、圧縮・引張とも強い構造としたものである。ただし、性能を発揮するにはコンクリートと鉄筋の付着が確保され、応力が伝達されることが重要である。そのため、一般的に異形鉄筋を用いてコンクリートと鉄筋との間に応力が伝達されるようにする。

コンクリート中の鉄筋のひずみを測定するには、ひずみゲージを貼りつけて、その抵抗値変化からひずみを測定することが多い。しかしこの方法は、ひずみゲージの部分でコンクリートとの付着に欠損が生じることや、ひずみゲージを貼り付けた位置でのひずみしか測定できず、連続した位置での測定ができない事などが懸念されていた。

付着を阻害せずに非破壊で連続的なひずみの測定が可能となる方法として、中性子回折法<sup>1)</sup>がある。既往の報告では、鉄筋コンクリート内部の鉄筋応力度分布を非破壊かつ連続的に高精度で捉えることに成功している<sup>1) 2)</sup>。

一方、ひび割れが発生したコンクリートの補修には樹脂を注入する「樹脂注入工法」が一般的に用いられる。この樹脂注入工法の補修効果に関する検討は、普通強度のコンクリートに対しては実施されているが<sup>3)</sup>、設計基準強度が $36\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリート<sup>4)</sup>に対する検討は極めて少ない。

今回、高強度コンクリートに対する樹脂注入工法の補修効果に関する基礎検討として、中性子回折法を用いた鉄筋コンクリート内部の鉄筋応力度分布測定を、株式会社長谷工コーポレーション、大末建設株式会社、東急

建設株式会社、西松建設株式会社、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、総合科学研究機構中性子科学センター (CROSS)、東京理科大学と共同で実施した。

## 2. 中性子ビームを用いた付着性能測定

中性子は放射線の一種である。一般に中性子は粒子としてその挙動が議論されるが、中性子のエネルギーが熱中性子以下になると波としての性質が生じる。その波長は $0.05\text{nm}$ 以上であり、この波の回折現象を利用して物質の結晶構造解析を行うのが、中性子回折法と呼ばれる手法である。

### 2.1 測定原理

非破壊の応力測定ではX線も用いられる。しかし、X線は全ての原子の周りに存在する電子雲と相互作用するため材料の奥深くまで透過する事ができない。一方、中性子は電子雲と相互作用をしないため奥深くまで透過する事が可能であり、材料の表面から内部にかけての応力分布を測定可能である。

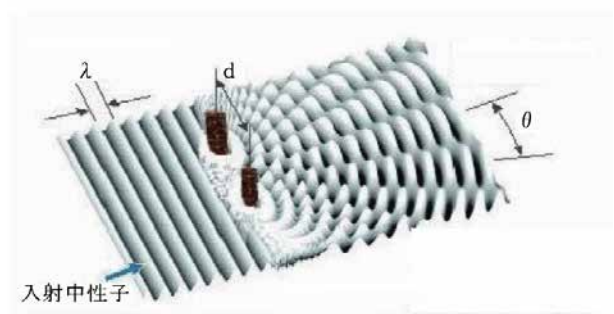


図-1 中性子回折法のイメージ (JAEA 提供)

\*1 建築研究部

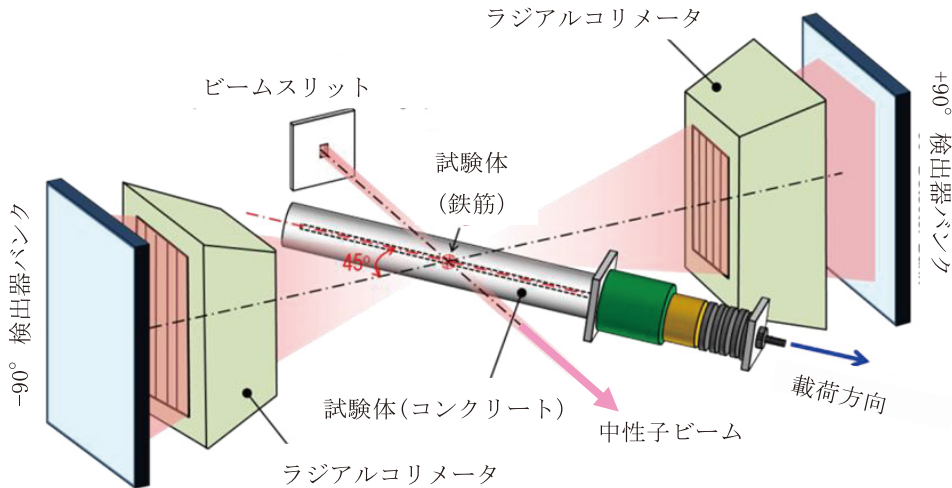


図-2 TAKUMI 測定概要図

表-1 使用したコンクリートの調合と強度

	試験体名	W/C[%]	s/a[%]	質量[kg/?]				28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
				水	セメント	細骨材	粗骨材	
①	40	55.0	55.4	180	327	967	792	48.9
②	70	37.5	51.8	180	480	840	792	74.7
③	100	25.0	44.6	180	720	627	792	111

中性子が鉄筋の結晶を構成する原子核に当たると図-1に示すような波の回折現象が生じる。载荷装置により鉄筋を引張ると鉄の結晶が伸び、元に戻すと結晶が縮む。つまり結晶の格子定数が変化する事になる。これらの時の中性子回折パターンと中性子強度の関係からリートベルト解析によるマルチピークフィッティングにより軸方向の格子定数  $a_0$  を測定し、式(1)を用いて弾性ひずみを求めた。

$$\varepsilon(x) = (\alpha(x) - \alpha_0) / \alpha_0 \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  : 弾性ひずみ、 $\alpha_0$  : 無負荷の時の格子定数である。

### 3. 実験

本実験では3水準のコンクリート強度の試験体を作製し、大強度陽子加速器施設 J-PARC MLF にある工学材料回折装置 (BL-19 TAKUMI) において中性子回折法による鉄筋応力分布の測定を行った。TAKUMI の測定概要図を図-2に示す。

本実験で使用したコンクリートの調合と強度を表-1に示す。試験体は図-3に示す通り、φ65mm の円形断面で長さ 350mm、コンクリート中心部に長さ 460mm の D13 異形鉄筋 (SD345) 1 本を設置した。また、载荷方向に

30mm、自由端側 20mm において、応力伝達を円滑にするため鉄筋とコンクリート間の付着を除去した区間を設けた。

使用したセメントは 40N/mm<sup>2</sup>、70N/mm<sup>2</sup> の試験体では普通ポルトランドセメントを、100N/mm<sup>2</sup> の試験体ではシリカフェウムセメントを用いた。水素原子は中性子の吸収性能が大きく、非干渉性散乱のバックグラウンドが大きくなるため、試験体に水を用いる場合バックグラウンドの少ない重水に置換して試験体を作成する場合があるが、今回練り混ぜ水は通常の水道水を用いた。ただし、測定に影響する水素原子を極力低減するため、打設後 48 時間で脱型して材齢 28 日まで水中養生を行った後、気中養生を経て 14 日間、40℃、60℃と温度を変化させながら強制乾燥を施した。

測定は付着除去区間の始まりを座標軸の 0 点とし、-15mm および 0 ~ +70mm の 10mm 間隔と +85 ~ +130mm の 15mm 間隔、+160、+200、+250、+300mm の計 17 点にて行った。载荷条件は、ロードセルにより測定した荷重を鉄筋の公称断面積で除した応力値として、8N/mm<sup>2</sup> と 250N/mm<sup>2</sup> の 2 水準とした。

### 4. 実験結果

図-4に測定した鉄筋応力分布を示す。縦軸の鉄筋応

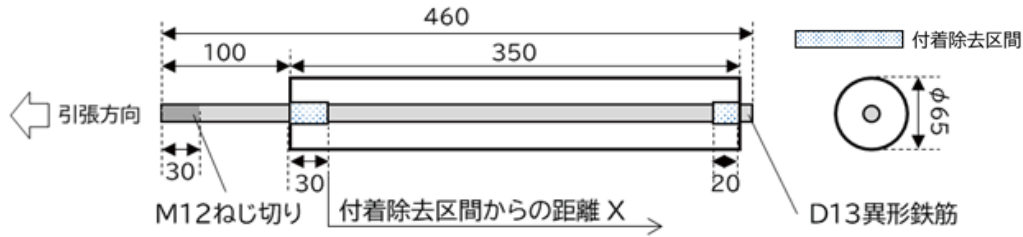


図-3 製作した試験体

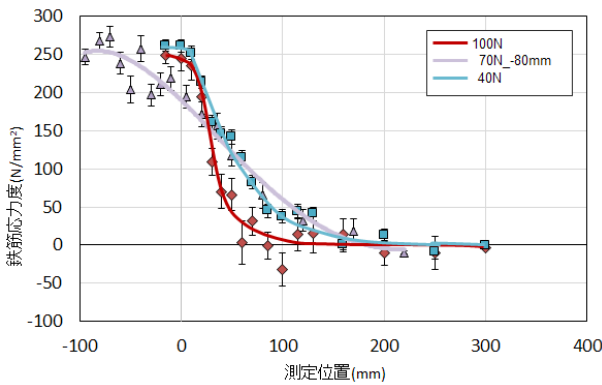


図-4 鉄筋応力度分布

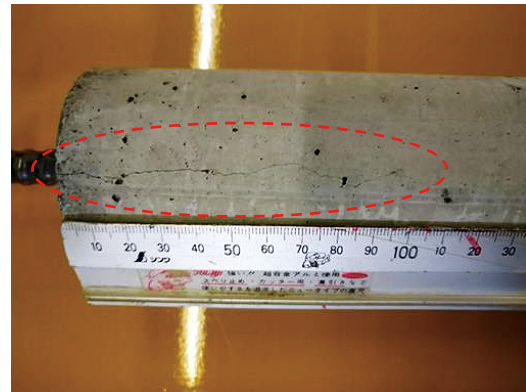


図-5 70N/mm<sup>2</sup>試験体のひび割れ状況

力は荷重応力  $8\text{N/mm}^2$  に対する  $250\text{N/mm}^2$  の相対値とした。

図-4より、全試験体において、 $X=-15\text{mm}$  の付着除去をした区間における鉄筋応力度は荷重による導入応力度に概ね等しい。取得データにばらつきはあるものの、各データを補完すると3次曲線で変化がわかる。 $X \geq 0$  の付着区間においては、 $100\text{N/mm}^2$  試験体では測定位置方向に対して急激な応力度の減少がみられ、 $40\text{N/mm}^2$  試験体では  $X=30\text{mm}$  以降において緩やか減少がみられた。これらの応力度分布の形は既往の研究<sup>2)</sup>と同様であり、本手法でコンクリートの強度によらず鉄筋応力度の高精度測定が可能であると考えられる。さらに、付着開始点から鉄筋応力度の値が0となるまでの距離(定着長)の比較においては、 $100\text{N/mm}^2$  試験体では  $40\text{N/mm}^2$  試験体の半分程度と大きな差がみられた。以上より、コンクリート強度と付着性能には相関があり、高強度コンクリートでは低強度のコンクリートに比べて付着性能が高いことが中性子回折法でも確認できた。

$70\text{N/mm}^2$  試験体については、試験後に試験体の表面を確認した結果、コンクリート部分の荷重側側面に他の水準では見られなかった鉄筋に沿った軸方向のひび割れが、何らかの理由で割裂したことが確認された(図-5)。これらは試験前には確認されていないため、荷重時に生じたものであると考えられる。生じたひび割れの長さは、積載面端面から  $110\text{mm}$  程度であり、付着除去区間からの距離は  $80\text{mm}$  程度まで生じていた。従って、 $0 \sim 80\text{mm}$  の

区間においては、鉄筋とコンクリート間の付着が切れていたと考えられる。

仮に、 $70\text{N/mm}^2$  試験体のみ全ての測定点を  $-80\text{mm}$  としてプロットすると、他の2水準と同様の傾向である事が確認された。なお、このひび割れが生じた原因や付着に大きな影響を与える鉄筋近傍の詳細なひび割れ状況については、外観からの考察のみでは困難であるため、今後さらに検討する必要がある。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 中性子回折法を用いることで、コンクリート強度によらず高精度で連続的に鉄筋応力度を測定することが可能である。
- 2)  $70\text{N/mm}^2$  試験体へ荷重時に生じたひび割れについて、ひび割れの発生した原因や詳細な状況を今後さらに検討する必要がある。

## 謝辞

本研究は、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の2019年度 MLF 利用成果公開型実験(課題番号:2019B0114)として実施した。本研究の実施にあたり、実験計画・立案は総合科学研究機構(CROSS)野間敬氏、東京理科大学 兼

松学氏, 西尾悠平氏, 小林謙祐氏, 日本原子力研究開発機構 (JAEA) 鈴木裕士氏, 長谷工コーポレーション 吉岡昌洋氏, 大末建設 平田吉一氏, 小田初次氏, 東急建設 大岡督尚氏, 西松建設木村仁治氏, 長井智哉氏, 試験体作製はフローリック 猪瀬亮氏ほか, 実験遂行は日本原子力研究開発機構 (JAEA) ステファヌスハルヨ氏, 川崎卓郎氏, 諸岡聡氏ほか, 多くの皆さまのご指導, ご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

- 2) 関根麻里子ほか: 中性子技術を用いた RC の腐食ひび割れ補修による鉄筋付着性能回復の検証, コンクリート工学年次論文集, pp. 1545-1550, 2018
- 3) 古内仁ほか: ひび割れを注入補修した鉄筋コンクリート梁の疲労耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 1243-1248, 2015
- 4) (社) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2018

#### 参 考 文 献

- 1) 鈴木裕士ほか: 中性子回折法による鉄筋コンクリートの付着応力度分布の非破壊測定, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, pp. 179-184, 2018

---



---

### Estimation of bond strength of reinforced concrete using neutron beam

Koichi OKUNO, Seiichiro TANAKA

Stress distribution for steel bars in reinforced concrete was estimated by the neutron diffraction method. Three types of concrete, including ordinary strength concrete and high strength concrete, were estimated using the engineering materials diffractometer BL19 in the J-PARC MLF.

The result revealed that the neutron diffraction method can be used to continuously measure the stress in steel bars with high accuracy, regardless of the concrete strength. In addition, it was confirmed that the bond performance of high-strength concrete was higher than that of low-strength concrete also by the neutron diffraction method.