

中性子回折法による短繊維補強コンクリート部材中の鉄筋ひずみの計測

三井住友建設(株)	正会員	修(工)	○竹山 忠臣
三井住友建設(株)	正会員	博(工)	佐々木 亘
日本原子力研究開発機構		博(工)	鈴木 裕士
岐阜大学	正会員	博(工)	内田 裕市

キーワード：鉄筋，付着特性，短繊維補強コンクリート，中性子回折法

1. はじめに

短繊維補強コンクリートに関する研究は古くから実施されており、コンクリート中に短繊維を混入する目的の一つにひび割れ幅の抑制が挙げられる。コンクリート中に混入した短繊維が効果を発揮するのは、主にひび割れ発生後である。しかし、一部の短繊維補強コンクリートを除き、通常、使用状態で短繊維補強コンクリートはひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮されていないのが現状である¹⁾。ひび割れ発生後の繊維の架橋効果を考慮した部材設計を行なうことができれば、より合理的な設計が可能になると考えられる。

鉄筋コンクリートにおけるひび割れ幅を検討するためには、鉄筋とコンクリートの付着特性、すなわち、鉄筋コンクリート部材中の鉄筋ひずみ分布を把握することが重要となる。筆者ら²⁾は鉄筋と短繊維補強コンクリートを併用した部材を対象とし、両引き試験により、ひび割れ間隔に関する検討を実施している。通常、コンクリートに発生するひび割れの位置が分からないため、鉄筋にひずみゲージを離散的に設置してもひび割れ面における鉄筋ひずみを測定できない可能性がある。このため、筆者らの検討では、ひび割れ面における鉄筋ひずみを測定する目的で、試験体の鉄筋にひずみゲージを設置した位置に割裂引張力を与えてひび割れを導入した後に両引き試験を実施している。

本検討では鉄筋にひずみゲージを設置しなくても、鉄筋コンクリート中の鉄筋ひずみを測定することができる中性子回折法³⁾を利用して、鉄筋とコンクリートおよび短繊維補強コンクリートを併用した一軸引張部材中の鉄筋ひずみ分布の計測を試みた。

2. 実験概要

2.1 検討項目

本検討では、中性子回折法による鉄筋コンクリート中の鉄筋ひずみ分布の検討を行なう上で、2段階の検討を行なった。ステップ1では、鉄筋とコンクリートの付着性能の把握を目的とし、テンションステイフニング効果を検討した。ステップ2で、中性子回折法による鉄筋コンクリート中の鉄筋ひずみ分布を検討した。いずれも普通コンクリート(PL)と短繊維補強コンクリート(F)の試験体で実施した。試験体数は各1体ずつとした。

2.2 試験体

試験体を図-1に示す。一辺が70mmの正方形断面中心にD10の異形鉄筋(竹節)を配置し、試験体長さは400mmとした。鉄筋のかぶりは30mmとした。D10の

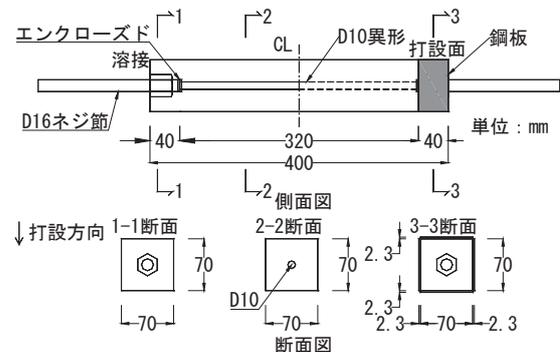


図-1 試験体

両端にはD16のネジ節鉄筋をエンクローズド溶接で接合した。D10の鉄筋の材質はSD345とした。鉄筋とコンクリートの付着特性に影響を与えないように、鉄筋にはひずみゲージを設置していない。試験体の側面(図-1中の断面図の左右)に異形鉄筋の節が向くように配置した。試験体端部の割裂破壊を防止する目的で、厚さ2.3mmの鋼板を試験体の4面にエポキシ樹脂を用いて接着した。

2.3 コンクリート

本検討では、普通コンクリートと短繊維補強コンクリートの2種類とした。コンクリートの水セメント比は55%とした。短繊維には、繊維径0.62mm、繊維長30mm、引張強度1100N/mm²で両端にフック加工が施された鋼繊維を使用した。短繊維は外割で混入しているため、普通コンクリートと短繊維補強コンクリートのマトリクスは同一である。繊維混入率は耐荷性能の向上¹⁾を目的とした短繊維補強コンクリートとするため、1.0vol.%と設定した。なお、筆者ら²⁾が既往の研究で実施している短繊維補強コンクリート(40-B)と同様である。

2.4 試験体の製作

コンクリートは容量100リットルの強制二軸ミキサにより練混ぜ、フレッシュ性状の確認後直ちに型枠内へ打ち込んだ。試験体は、材齢3日まで湿布養生を行ない、型枠を脱枠し、実験室内に静置した。テンションスティフニングを検討する試験体と中性子回折法による鉄筋ひずみを測定する試験体と強度試験用の供試体は、PLとFのそれぞれすべて同一バッチ内のコンクリートで製作した。

2.5 テンションスティフニングの検討

図-2に試験方法を示す。両引き試験には、容量500kNの万能試験機を用いた。計測項目は、荷重、試験区間の変位、パイ型変位計による開口幅とした。試験区間の変位は試験体端部から75mmの位置に変位計を設置して測定し、試験区間は250mmとした。変位計は容量25mmの高感度変位計を使用した。開口幅は、検長50mm、容量2mmのパイ型変位計を試験体の側面の試験体軸方向に沿って千鳥に片面3台ずつ、計6箇所測定した。

2.6 中性子回折による鉄筋ひずみ分布の検討

両引き試験による鉄筋コンクリート中の鉄筋ひずみの測定は、J-PARC MLF(茨城県東海村)のBL-19工学材料回折装置TAKUMIを使用した。測定概念図を図-3、試験状況を図-4に示す。TAKUMIは中性子線の回折現象を利用して、測定領域内の結晶の原子間距離の変化、すなわち鉄筋コンクリート中の鉄筋のひずみ(応力)を非破壊・非接触で測定することができる。ある変形を与えることで結晶間の距離が変化すると、中性子線の発生から鉄筋による回折、そして検出器によって計測されるまでの時

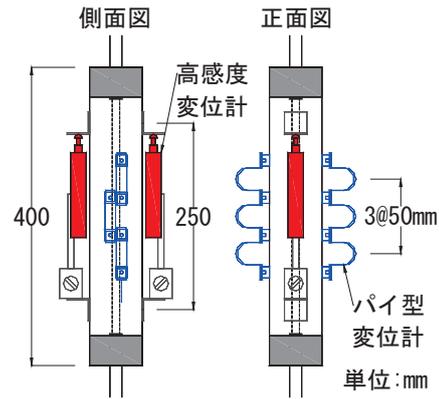


図-2 試験方法

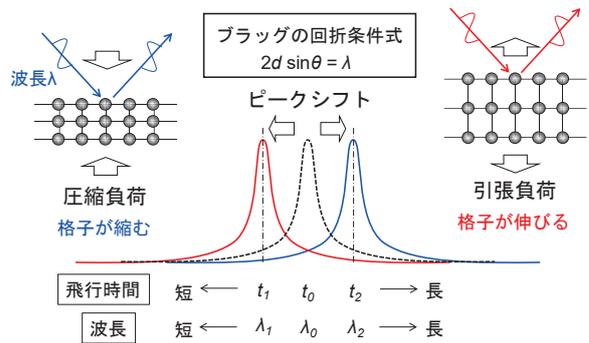


図-3 ひずみ測定原理

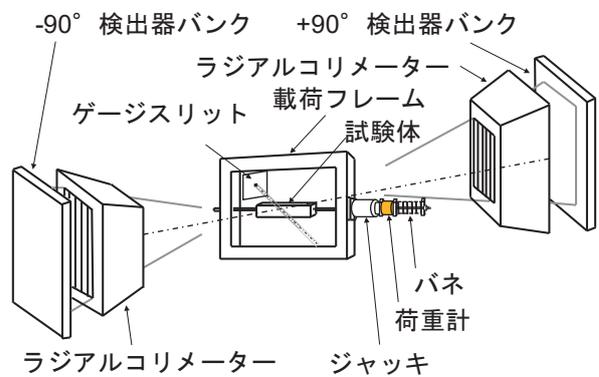


図-4 試験状況

間（飛行時間）が変化するため、ひずみを求めることが可能となる。

中性子回折法による鉄筋ひずみの測定は、試験体中央部の200mm区間を10mm間隔（21点）で測定し、入射ビームサイズは10×10mm、ラジアルコリメータは5mm、中分解能モードで測定した。鉄筋ひずみの測定は1点あたり1時間、中性子を照射することで実施した。中性子回折により得られた回折プロファイルをリートベルト解析法によるマルチピークフィッティングにより格子定数を求めて、鉄筋ひずみを算出した。

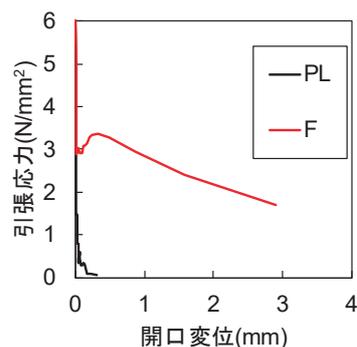


図-5 引張軟化曲線

3. 実験結果（両引き試験結果）

3.1 テンションスティフニングの検討

試験時のコンクリートの圧縮強度は、PLが62.5N/mm²、Fが65.4N/mm²であった。JCI試験方法⁴⁾に基づいて算出した引張軟化曲線を図-5に示す。本検討で使用したD10異形鉄筋（試験区間の鉄筋）の力学特性は鉄筋単体の引張試験結果から、降伏点が377.8N/mm²、引張強度554.3N/mm²、弾性係数190.3kN/mm²であった。

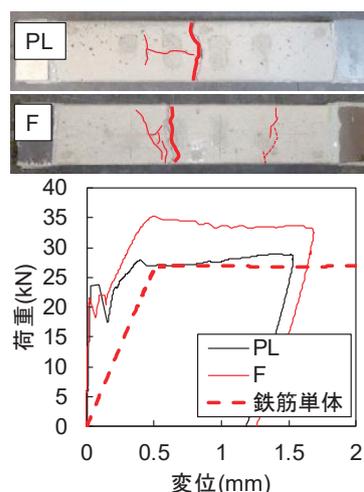


図-6 荷重－変位関係

図-6に両引き試験から得られた荷重－変位関係と試験終了後の試験体のひび割れ状況を示す。図-6には鉄筋単体の荷重－変位関係も併せて示した。これは、D10鉄筋単体の引張試験結果より得られた荷重－ひずみ関係の平均曲線から試験区間250mmの変位として表わした結果である。実験は、パイ型変位計で計測された開口幅が1.5mmを超えるまで行なった。PLは試験体中央にひび割れが1本発生し、そのひび割れのみが拡幅した。Fは、複数のひび割れが発生し、その内の1本のひび割れが拡幅した。PLの荷重－変位関係は、ひび割れ発生後、荷重が一旦低下してから再度上昇し、鉄筋単体に漸近している。Fはひび割れ発生後、荷重が一旦低下したが、鉄筋単体、PLよりも同一変位では高い荷重を保持している。

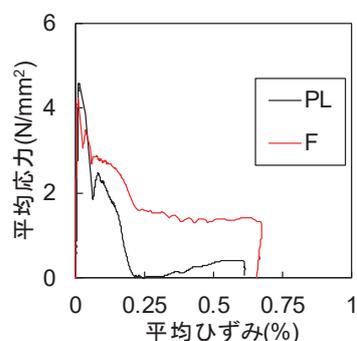


図-7 平均応力－ひずみ関係

図-7にコンクリートの平均応力－平均ひずみ関係を示す。

ここでの平均応力は、図-6に示した部材の荷重－変位から鉄筋単体の荷重－変位を差し引いて試験体断面積で除した応力値である。また平均ひずみは、測定された試験体の変位を試験区間長250mmで除した値である。PLはひび割れ発生後、応力が低下するのに対して、FはPLよりも緩やかに応力が低下するのが分かる。

3.2 中性子回折による鉄筋ひずみ分布の検討

図-8に中性子回折法により試験体にひび割れ発生後の鉄筋ひずみを測定した結果と試験終了後の試験体のひび割れ状況を示す。中性子回折法による鉄筋ひずみの測定は、ひび割れが発生後（PL:20kN、F:25kN）と除荷後（1kN）に実施した。鉄筋ひずみは、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみから除荷後の荷重1kNの時の鉄筋ひずみを差し引いた相対ひずみを示している。これは、試験体に荷重を1kN与えることで、鉄筋に中性子を照射する際、所定位置に試験体を固定するためである。図中には、ひずみ計測時の引張荷重を鉄筋の公称断面積とヤング係数で除した場合の鉄筋ひずみ（コンクリートの引張抵抗

を無視した値)を示してある。図-8より、PLではコンクリートの引張分担を無視した鉄筋ひずみの値とはほぼ同程度の位置が2箇所存在することが分かる。試験終了後の試験体の状況と比較すると、この極大値を示した位置はひび割れの発生位置とほぼ一致した。一方、FではPLと比べて値は小さいものの鉄筋ひずみの高い位置が3箇所存在し、2箇所はひび割れ位置と対応していた。Fの鉄筋ひずみの測定結果より推定される3箇所のひび割れの内、1箇所のひび割れ(図中+70mm位置)は繊維の架橋効果により、ひび割れの進展が抑制され、試験体表面ではひび割れが確認できなかったものと考えられる。また、Fの鉄筋ひずみの最大値から鉄筋の分担力を求め、作用荷重から差し引くことでコンクリートの分担応力を算出すると

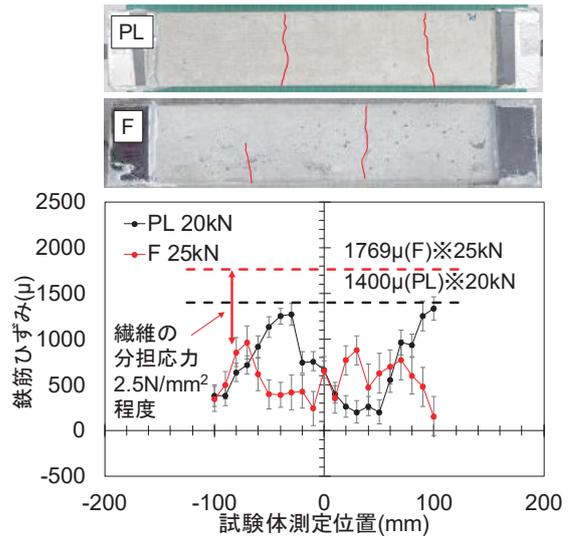


図-8 鉄筋ひずみ測定結果

2.5N/mm²程度となった。ひずみ計測時(荷重25kN)の試験区間の変位は図-6から推測すると0.25mm程度であり、ひび割れが3本発生したことから、個々のひび割れ幅は0.1mm程度と推測される。引張軟化曲線(図-5)においてひび割れ幅0.1mmの時の引張応力は3N/mm²であるのに対して、ひび割れ位置の鉄筋ひずみから推測されたコンクリート分担応力は2.5N/mm²であったことから、鉄筋コンクリート部材のひび割れ位置における繊維の架橋効果を概ね測定できていることが分かる。

4. まとめ

本検討では、鉄筋コンクリート中の鉄筋のひずみ分布を中性子回折法により計測した。その結果、普通コンクリートを用いた部材のひび割れ位置で計測された鉄筋ひずみは計算値とほぼ一致し、中性子回折法による鉄筋ひずみの計測の有効性が確認された。また、短繊維補強コンクリートを用いた部材では、ひび割れ面付近における鉄筋の引張力が繊維の架橋効果により低減されることが示され、ひび割れ位置における繊維の分担応力は、短繊維補強コンクリートの引張性能から妥当な値であることが示された。

謝辞

本検討は、2018年度MLF利用成果公開型実験(課題番号2018A0181 代表 竹山忠臣)として実施した。本検討の実施にあたり、日本原子力研究開発機構ステファヌスハルヨ博士、川崎卓郎博士、諸岡聡博士、東京理科大学兼松学教授、ほか多くの方々に協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ119, 繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会(第2期)成果報告書, 2018.9
- 2) 竹山忠臣, 佐々木亘, 篠崎裕生, 内田裕市：短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 20, pp. 1207-1212, 2018
- 3) 鈴木裕士, 楠浩一, 兼松学, 向井智久：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, No. 17, 2017.10
- 4) JCI基準：切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法JCI-S-002-2003