

分布型光ファイバセンサを用いた高強度繊維補強モルタル内の鉄筋ひずみ計測

五洋建設(株) 技術研究所 正会員 池野 勝哉 正会員○田中 智宏
 ペンタテクノサービス(株) 非会員 長瀬 靖佳 非会員 牧野 常雄
 (株)富士テクニカルリサーチ 非会員 山本 勝

1. はじめに

OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサ計測は、BOTDR や FBG といった他の方式と比較して非常に高い空間分解能を有するため、建設分野においても様々な試みがなされている¹⁾。本研究では、高強度繊維補強モルタルに埋め込まれた鉄筋の片側引抜き試験を通して、OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサによる鉄筋ひずみを計測し、従来の電気式ひずみゲージと比較することで、その有効性について考察した。

2. 計測原理およびシステム

光ファイバの石英ガラス分子には微小な密度ムラがあり、ファイバ内に波長可変レーザーを入射すると、各所の屈折率に応じた反射光（レイリー散乱光）が発生する。反射光を干渉させることで位置情報が取得でき、ファイバに外力が作用すると、その反射光のスペクトルが変化する特性を利用してひずみを求めている。本研究では、図-1 に示す LUNA Innovations 製の FBI-Gauge²⁾ を使用し、サンプリング 20Hz で鉄筋軸に沿ったひずみ分布を 2.6mm ピッチで計測した。

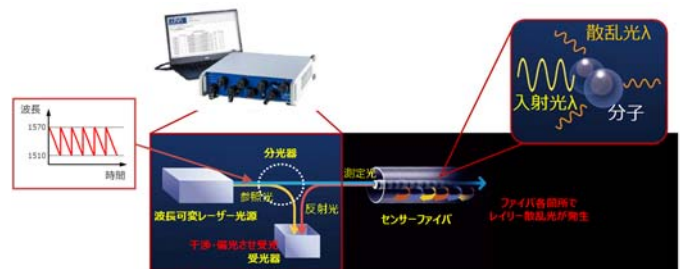


図-1 FBI-Gauge システムの概要

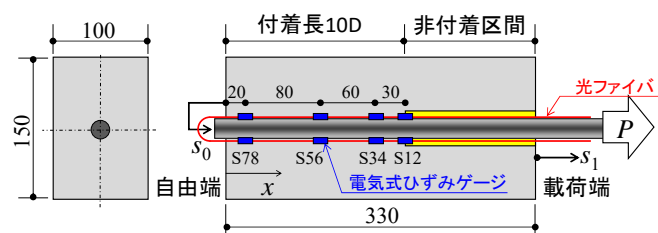


図-2 片側引抜き試験の概要

3. 片側引抜き試験

(1) 試験体の概要

試験体寸法は高さ 150mm、幅 100mm、長さ 330mm、有効付着長は 190mm (=10D) である。実験材料は高強度のネジ節鉄筋 D19 (USD685, 降伏点 713.7N/mm², 弾性係数 195×10³N/mm²) および高強度繊維補強モルタル (圧縮強度 119.9N/mm², 割裂引張強度 14.8N/mm², 弾性係数 42×10³N/mm²) である。なお、高強度繊維補強モルタルは、鋼繊維 ($\phi=0.16-0.22\text{mm}$, $l=13-20\text{mm}$) を体積比 2.0% で混入して作製している。荷重は鉄筋軸を水平にした状態で、センターホールジャッキ (350kN) により鉄筋に単調な引張力を作用させた。計測項目は鉄筋ひずみ ϵ 、引抜き荷重 P 、荷重端 s_1 および自由端 s_0 の変位である。試験概要図を図-2、試験状況を写真-1 に示す。



写真-1 試験状況

(2) 光ファイバの鉄筋取付け方法

ネジ節鉄筋の両フラット面に溝加工 1mm×1mm を施し、光ファイバ (直径 155 μm) を埋め込んだ後、溝をシリコンシール材で保護した (写真-2)。さらに、従来の電気式ひずみゲージ (3.0mm) を図-2 に示した位置において鉄筋両面に貼り付け、モルタルとの付着特性に悪影響が無い様、最低限の防水処理を施した。



写真-2 光ファイバの取付け方法

キーワード OFDR 方式, 鉄筋ひずみ, 高強度繊維補強モルタル

連絡先 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設 (株) 技術研究所 TEL 0287-39-2109

4. 試験結果および考察

(1) 計測ひずみの比較

片側引抜き試験で得られた荷重-変位関係を図-3 に示す。荷重端の変位 $s_1=4\text{mm}$ 付近で鉄筋が降伏し、自由端の変位 s_0 は終始ゼロである。次に、電気式ゲージおよび光ファイバで計測された鉄筋ひずみ（両面計測値の平均）の代表点（S12, S78）を図-4 に示す。S12 を見ると、光ファイバは鉄筋が降伏ひずみ ($\varepsilon_y=3665\mu$) に達した後、大きく振動しており、塑性後の急激なひずみ変化を捉えられていないことが分かる。これは、ひずみ勾配が極端に大きくなり、反射光のスペクトル演算が正常に処理できなかったためだと考えられる。

(2) 局所付着応力-すべり関係

計測した鉄筋ひずみ分布を引抜き荷重 (P/P_y , P_y は降伏荷重) のステップ毎に整理したものを図-5 に示す。なお、電気式ゲージは計測値のプロットを2次スプライン補間した曲線を破線で示している。図中より、折れ曲り付近（付着と非付着区間の境界）で両者に差異が見られるが、電気式ゲージは離散点を補間しているため真値ではない。これらのひずみ分布から式(1)より求めた局所付着応力-すべり関係を図-6 に示す。図中には超高強度繊維補強コンクリートとネジ節鉄筋による川口ら³⁾の推定式を黒線で併記しているが、本実験の高強度繊維補強モルタルとネジ節鉄筋の局所付着応力-すべり関係を安全側に評価できるものと考えられる。

$$\tau = \frac{E \cdot D}{4} \frac{d\varepsilon}{dx}, \quad s = \int_0^l \varepsilon dx + s_0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 D : 鉄筋径, E : 鉄筋の弾性係数, ε : 鉄筋ひずみ, s_0 : 自由端の変位, l : 自由端から着目点までの距離

5. おわりに

本実験より、OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサは鉄筋の弾性範囲内において、従来の電気式ゲージと同等の計測精度であることが確認された。また、本技術は従来の電気式ゲージと比較して、鉄筋の付着性能を阻害せずに高い空間分解能で計測できるため、鉄筋等の線状鋼材のひずみ計測に有効であることが分かった。

参考文献

- 1) 今井ら：高精度光ファイバセンサを用いたひずみ・変位計測の検証実験，令和2年土木学会全国大会第75回年次学術講演会，CS9-28，2020
- 2) 高原忠良：光ファイバ計測システム「FBI-Gauge」の自動車分野での最新活用状況，自動車協会，pp.16-17，2020
- 3) 川口ら：超高強度繊維補強コンクリートと補強用材料の付着応力伝達機構，土木学会論文集E，Vol.65，No.1，pp.1-15，2009

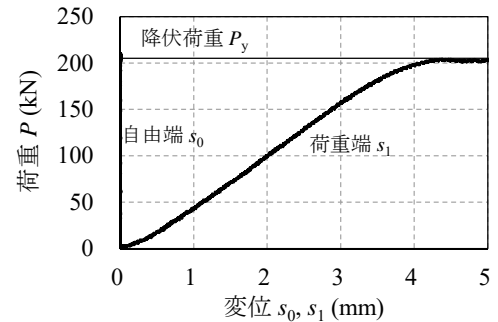


図-3 荷重-変位関係

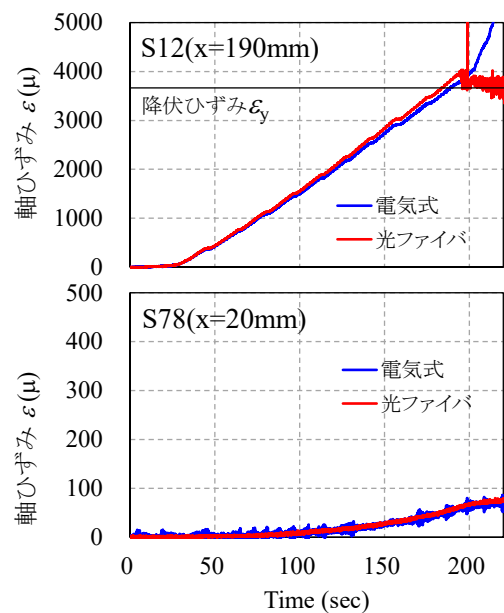


図-4 計測ひずみの比較

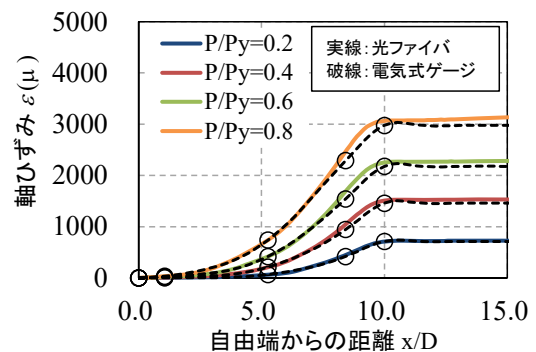


図-5 鉄筋の軸ひずみ分布

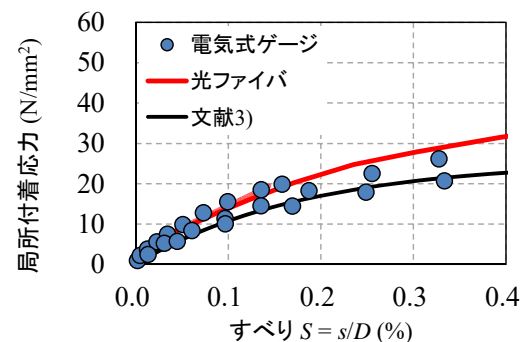


図-6 局所付着応力-すべり関係