

## 鋼-FRP 接着積層部の光ファイバセンシング

豊橋技術科学大学 正会員 山田 聖志 (株)ドーコン構造部(元豊橋技術科学大学) 正会員 ○吉田 安寿  
トピー工業 正会員 山田 聡 福井ファイバーテック 正会員 小宮 巖

## 1. はじめに

近年構造物の老朽化が問題となってきており、その対策として軽量で塩害を受けない繊維補強ポリマー (FRP) の接着補強が行われている。一方、FRP は主構造材料としても利用されており、2008 年には 3 橋の FRP 橋梁が竣工した。こうした FRP 構造物の接合部には、鋼ガセットプレートを用いた接着接合も行われている。接着層の損傷は大地震や経年劣化によって生じる可能性があるため、接着層のモニタリングを行う必要があると考えられる。しかしその方法についてはあまり検討されていない。ところで、ライフサイクルコストの低減のために、ヘルスマニタリングの必要性が高まっており、光ファイバセンサを用いる方法に注目が集まっている。光ファイバセンサは計測精度や耐環境性が優れており、その中でも回折格子型光ファイバセンサ (FBG センサ) は他の光ファイバセンサに比べ歪の検出精度が高く、細径であることから、接着層でも歪計測が可能であることがわかっている。そこで本研究では、光ファイバセンサによる接着層モニタリングの有効性を確認することを目的として、接着層内部に FBG センサを装着した試験体の引張実験を行い、その出力特性の変化について分析を行った。

## 2. 実験概要

試験体は接着層厚を 0.4, 0.8, 1.2mm の 3 パターンに変化させて実験を行った。接着層厚は、接着層の内部に鋼球を挟むことで調整した。図 1 に試験体概要、表 1 に試験体名と接着層厚さ、写真 1 に試験体を示す。載荷方法は単調引張載荷とした。FBG センサは接着層内部に装着し、幅方向の歪を検出するように配置した。試験体に使用した鋼材は SS400、FRP は体積含有率 57vol% の一方向材を使用した。鋼材と FRP の接着にはエポキシ系接着剤 E250 を用いた。接着の養生日数は 18 日とした。

FBG センサの出力は 2 つある。1 つは波長で、この変化量  $\Delta\lambda_B$  から歪を求めることができる。波長の変化量と歪の換算式を式(1)に示す。もう 1 つは波形で、図 2 に示す 2 パターンの形状があり、センサを装着した部分に損傷が生じるとその形状が図 2(a)から図 2(b)に変化する。尚、本研究では、光パワースペクトル形状が単一のピークをもつものを単一ピーク型、複数のピークをもつものを複数ピーク型と定義している。

$$\varepsilon(\mu\text{strain}) = 833(\mu\text{strain}/\text{nm}) \times \Delta\lambda_B(\text{nm}) \quad (1)$$

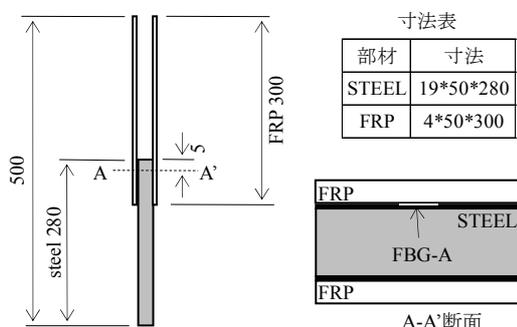


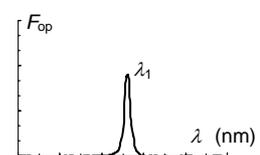
図 1 試験体概要 (unit: mm)

表 1 試験体名と接着層厚

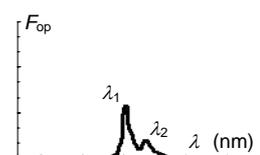
試験体名	JD04F	JD08F	JD12F	JD08N
FBGセンサ	有	有	有	無
接着層厚	0.4mm	0.8mm	1.2mm	0.8mm



写真 1 試験体写真



(a) 単一ピーク型



(b) 複数ピーク型

図 2 FBG センサ反射波形

キーワード FRP, 光ファイバセンサ, 接着層, モニタリング

連絡先 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 豊橋技術科学大学 (Tel)0532-44-6849

### 3. 実験結果

図3にFBGセンサの出力から得られた荷重-歪関係を示す。図4にFBGセンサの出力した波形を示す。図4は図3内の○(JD04F), △(JD08F), □(JD12F)で示す計測時の波形を示している。荷重の増加に伴う波形の変化に注目すると、すべての試験体で光パワピーク値の低下が見られた。その他の特徴として、JD04Fは幅方向の膨らみが生じ、複数ピーク型に変化した。JD08Fは最終的に複数ピーク型に変化した。JD12Fは単一ピーク型を保ったままはく離に至った。このことから、FBGセンサによる損傷検出にはピークパワーの低下によって波形がよりなだらかな丘状に変わる変化に注意することで可能になると考察される。図5に荷重と出力波形の光パワピーク値の低下量 $\Delta F$ の関係を示す。3試験体とも、 $\triangleright$ で示す荷重レベルから $\Delta F$ が大きくなっていく。この荷重は接着層厚が大きいほど小さくなる傾向がある。これより、波形が変化した結果である光パワピーク値の低下量を定量的に評価することで、接着層の損傷を評価できる可能性が示唆されている。

### 4. 理論値

接着積層部の微小要素の力の釣合から鋼、接着層に生じる応力を求めた。式(2)~(3)に試験体中央からの距離 $x$ (図1の鉛直上向き方向を正とする)における鋼材の軸力、接着層のせん断応力度を示す。

$$S_s = \frac{P}{2 \sinh \lambda} \sinh \lambda \xi + \frac{P \cosh \lambda \xi}{2 \cosh \lambda} \left( \frac{k-1}{1+k} \right) + \frac{P}{1+k} \quad (2) \quad \tau = \frac{P}{2lb} \left\{ \frac{\lambda \cosh \lambda \xi}{\sinh \lambda} + \frac{\lambda \sinh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \left( \frac{k-1}{1+k} \right) \right\} \quad (3)$$

ここに、

$$\lambda = \sqrt{\frac{GI^2}{t} \left( \frac{1}{E_m h_m} + \frac{1}{E_s h_s} \right)} \quad k = \frac{E_m h_m}{E_s h_s} \quad \xi = \frac{x}{l} \quad l: \text{接着長さの} 1/2$$

図6に鋼材に生じる応力度と試験体中央からの距離の関係を示す。図6中の□は試験体JD08Nの実験値から求めた応力度、実線は式(2)の軸力を断面積で除して求めた応力度を表す。2つ応力度がほぼ同程度の値であるため、式(2)は接着層の状態を精度よく表現しているといえる。図7に接着層に働くせん断応力度と接着部中央からの距離の関係を示す。これより、せん断力は接着端部で急激に大きくなるのがわかる。尚、FBGセンサの反射波形の変化はセンサ部領域の歪分布の不均一性によるものなので、本問題では図7の理論解から引張方向(x)センサを装着するのは損傷検出には適切でないと推測できたので板幅方向に装着した。

### 5. おわりに

FBGセンサによる接着層のモニタリングの有効性を確認することを目的として実験を行い、出力波形について分析を行った結果、波形の変化によって、接着層の損傷を評価できる可能性が示唆された。

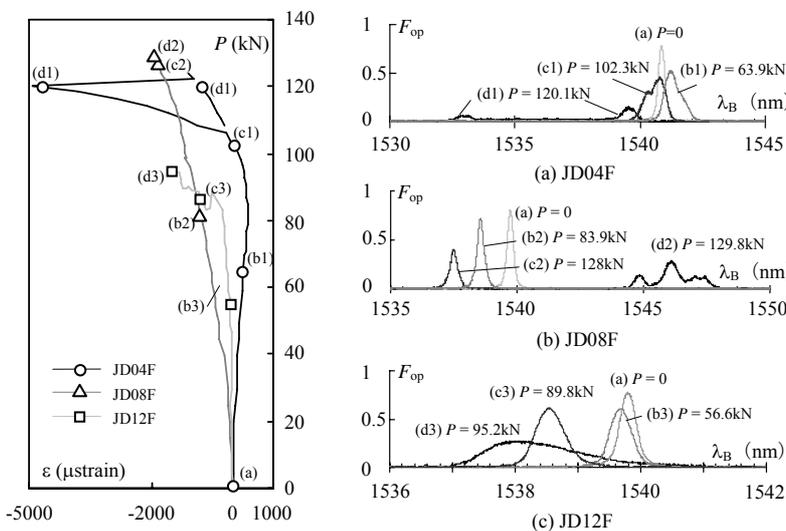


図3 P-ε関係

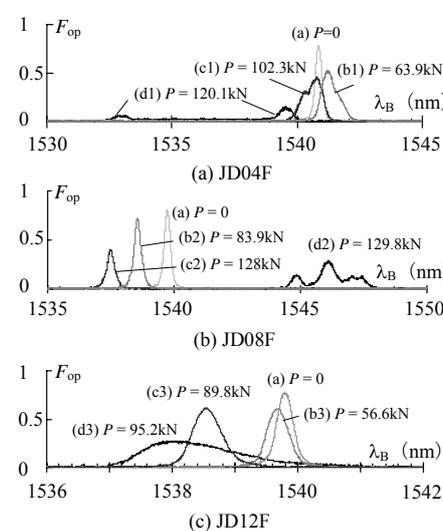


図4 波形測定結果

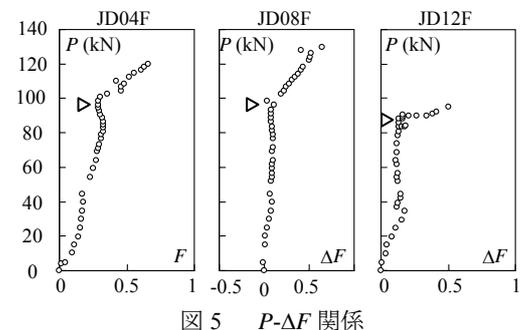


図5 P- $\Delta F$ 関係

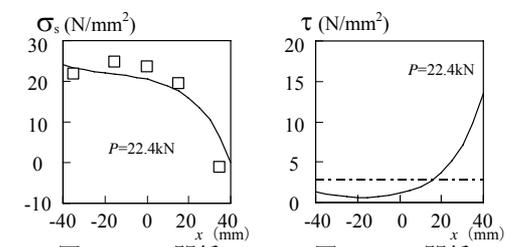


図6  $\sigma_s$ -x関係

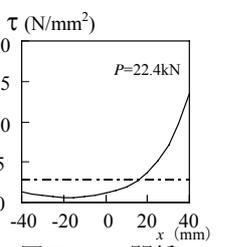


図7  $\tau$ -x関係