# 複合応力を受ける接着接合部のFBGセンサを用いた損傷モニタリング

豊橋技術科学大学 豊橋技術科学大学 首都大学東京 東京工業大学

## 1. はじめに

構造物の接合方法の1つである接着接合は,異種材の接合が 容易であることに加え,施工性の観点から CFRP による補強等 において実用化されている<sup>1)</sup>。しかし,破壊モードが脆性的であ ることから,適切な損傷評価が必要である。更に,接着層内部 の歪を計測することは困難で,計測歪と解析値の比較に関する 研究も乏しい。筆者らは,FBG センサによってセンサ区間のク ラック等による歪の不均一性を反射波長のパワースペクトル (OPS)形状で判断できること(図1),小型で埋設可能である 等の特徴に注目し,接着層の歪計測と損傷評価に関する検討を 進めている<sup>2)</sup>。以上を踏まえ,本報では複合応力を受ける鋼構造 接着接合部を対象として,FBG センサによる計測結果を比較し 接着層の損傷が検知可能であるかを検証する。

### 2. 試験方法と解析法

本研究では、複合応力を作用させるため、接着面を載荷方向 に対して 45 度傾けた V 形の接着面を有する試験体を採用した。 図 2 に試験体形状、歪ゲージ及び FBG センサ設置位置を、図 3 に試験の様子を示す。接着剤は、凝集破壊 100%時に 19.6MPa の接着強度を持つ市販のエポキシ樹脂系接着剤 E250(コニシ製) を使用した。接着面はロータリー式ブラスターにより、十点平 均粗さ Rz=30 程度となる下地処理を行った。FBG センサの埋設 位置については、事前に FEA を行った上で接着層の応力が最大 となる接着層端部から 5mm の位置に決定した。載荷方法は、引 張負荷除荷漸増載荷とした。載荷プログラムは、初期の最大荷 重を 40kN として、最大荷重到達後 10kN まで除荷する載荷ステ ップを 5 ステップ繰返し、その後、最大荷重を 10kN ずつ上昇さ せるものとした。以下では、各ステップの最大荷重に達した時 を載荷時、10kN まで除荷した時を除荷時と呼ぶこととする。

FEM 解析は線形応力解析とし、試験実施前に接着層内部の応 力分布を明らかにして接着剤損傷開始位置を特定するとともに, 試験において FBG センサにより計測された歪と解析値を比較す ることにより実験の妥当性及び接着剤損傷の進行度合いを検証 する。FEA モデルは対称性を考慮し 1/4 モデルとしており、概 要を図4に示す。解析における接着層厚さは破壊後に膜厚計に より計測した層厚に基づき 0.4mm としている。要素は 6 面体 2 次要素とし、メッシュ分割数は接着層において層厚方向に 4 分 割,長さ方向に 160 分割,高さ方向に 25 分割している。材料は 等方性材料とし、鋼材と接着剤の弾性係数をそれぞれ 205GPa, 4.11GPa, ポアソン比を 0.3, 0.37 とした。FEA において, 接着層 の損傷を模擬するため、擬似的な損傷状態を図5のようにモデ ル化している。なお、FBG センサは接着材硬化過程において埋 設位置が若干移動するため,解析値と計測歪を比較する際には, それぞれの試験体の破断面からセンサ埋設位置を計測し、その 埋設位置の解析値を用いて比較を行った。



キーワード 光ファイバセンシング FBG センサ 接着接合 連絡先 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ケ丘 1-1 (Tel)0532-44-6845

### 4. 試験結果と考察

図6(a)に歪ゲージによる荷重-歪関係と解析値の一例として歪 ゲージ1,2の結果を示す。ここで、試験結果は試験体の偏心による 影響を取り除くため表裏同位置にある歪ゲージの値を平均したも のを用い、解析値は損傷を加味しないモデルにより得られた結果 を用いた。図6(b)では歪ゲージ5~16の結果と解析値を比較する。 これより、試験体には捩れがあったことが確認されるが、X,Y軸 について対称な4箇所の歪ゲージの値を平均した捩れ補正後は解 析値との対応が見られる。以上より、歪ゲージの平均値と解析値 が対応していると判断できる。

図7に各試験体のFBG センサによる荷重-盃関係と解析値を示 す。これより,損傷モデルでの損傷進行長さが5mmから20mmと 長くなった場合,歪の変化量が0に近づく傾向が見られる。この 歪変化は,接着層の損傷が進行するにつれ,接着層が健全状態で 荷重伝達が正常に行われている位置からFBG センサ位置までの距 離が長くなり,センサに伝わる荷重が減少するためであると考え られる。しかし,接着層損傷による歪の減少傾向をFBG センサが 捉えるのは,接着層の損傷長さがFBG センサ位置を越えてからで あると考えられる。

FBG センサの図1の特性を踏まえて図8の OPS 波形変化を考察 する。載荷時において Step.35 付近から波形の移動が見られ, Step.55 付近からは除荷時の波形が複数ピーク型となり、その後、複数ピ ールが顕著になる様子が見てとれる。Step.77 付近では波形変化が 特に激しくなり、試験体は破断した。破断に近づくにつれて大き な波形変化が見られたことから接着剤が非弾性となることに起因 する損傷検知が行えていたと考えられる。更に,既往研究<sup>2)</sup>で提案 した OPS の定量化手法を基にして評価・分析を行った結果を図9 に示す。載荷ステップが増えるにつれて指標値が増加しており, 破断直前においては、圧縮モーメントと比較して引張モーメント の増加幅が大きくなっている。載荷開始直後は圧縮モーメントを 下回っていた引張モーメントが最終的には圧縮モーメントを上回 っている。このようなモーメント指標値の動きは二面純剪断形式 での試験においても同様の結果<sup>2)</sup>が得られていたことから,本研究 で用いた分析指標における損傷評価では引張モーメントの増加を 破壊前の予兆として用いることができると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、複合応力を受ける鋼構造接着接合試験体に対して 引張剪断試験を実施するとともに、有限要素法による線形解析を 行い、試験結果の妥当性及び接着剤損傷後の歪分布の変化につい て検討を行った。加えて、OPS を定量化し、その分析指標から接 着剤の損傷評価を行った。その結果、[1] 歪ゲージによる計測歪及 び FBG センサによる接着層内部の計測歪と解析値の比較し、対応 を確認し、[2] OPS の波形においては単一ピーク型から複数ピーク 型への波形変化が見られ、損傷を検知できること、[3] モーメント 指標の急激な減少や破壊前に引張モーメントが圧縮モーメントを 上回る現象より、接着剤の剥離や損傷を検知できることを示した。



**謝辞**本研究は国土交通省建設技術研究開発助成制度(平成 27,28 年度)の一部として行われました。ここに記して謝意を表します。 参考文献

- 1) 複合構造委員会・FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会:FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術,土木学 会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.5, II\_120-II\_133, 2014
- 2) 織笠千春,吉岩明彦,水野洋輔,中村健太郎,中村一史,松本幸大:FBG センサによる接着接合内部の損傷モニタリングに関する基礎検 討,第 57 回光波センシング技術研究会講演論文集, pp.95-100, 2016.6