

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月25日現在

機関番号：92604

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21681023

研究課題名（和文）安全なコンクリート補強のための光ファイバセンサによる剥離検知技術に関する研究開発

研究課題名（英文）Study on Debonding Detection for Concrete Retrofitted Sheet Using Optical Fiber Sensor

研究代表者

今井 道男（IMAI MICHIO）

鹿島建設株式会社技術研究所・先端マトロクスグループ・主任研究員

研究者番号：20399702

研究成果の概要（和文）：光ファイバに沿って変化するひずみを連続的に広範囲で計測できる分布型光ファイバセンサを用いて、コンクリート補強繊維シートの剥離検知技術を研究した。シート内に敷設した分布型光ファイバセンサにより、ひずみが一定値を示す場所を剥離箇所として検知することができた。当該箇所ではシートとコンクリート間で応力伝達がないためである。本研究ではセンサの実装方法を検討、実験による検証を行うとともに、シート界面の破壊モデルについても考察した。

研究成果の概要（英文）：To monitor retrofitted sheet on the surface of aging concrete structure, debonding detection for the sheet is studied using advanced optical fiber strain sensor, which is able to measure strain distribution along the whole sensing fiber. At the debonded region, because no stress is transferred from the host structure to the retrofitted sheet, strain on the sheet remains constant. In this study, installation of the sensing fiber into the sheet is developed and experimentally validated to detect debonding using optical fiber strain sensor. Additionally, the measured interfacial stress-strain model is examined.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	8,100,000	2,430,000	10,530,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム工学・社会システム工学・安全システム

キーワード：安全システム

## 1. 研究開始当初の背景

わが国の社会基盤の劣化が叫ばれるなか、構造物の延命化の手段として繊維強化プラスチック（FRP）を利用した補強工法の事例が増えている。例えば、既存コンクリート橋

の補強には、帯状のFRPシートを桁下面にエポキシ接着剤などを用いて貼付する。FRPは軽量、高耐久性などの利点を持ち、重機などを用いることなく短工期で、死荷重を増やすことなく構造性能向上を可能にすることが

できる。一方、こうした FRP 補強の破壊モードのひとつとして、FRP 材がコンクリートから剥離する事例が報告されている。コンクリートにひび割れが生じると、ひび割れ端部で FRP 応力が接着剤や近傍のコンクリートのせん断耐力を上回り、補強用 FRP 材に剥離が生じる場合がある。こうした剥離は、徐々にその領域を増やし、最終的には FRP 補強自体の破壊に至る。これらの破壊モデルに対する研究はなされているものの、実際には既存コンクリート性能やひび割れの発生箇所など不確定要素が多く、さらに接着性能は施工状況に大きく依存するため、施工後の剥離検知手法が不可欠である。現在は、打音などによる表面からの検査が主流であり、客観的かつ効率的な検査技術が望まれている。

一方、光ファイバセンサが構造物のひずみの変化などの変状をモニタリングする手段として注目されている。その特長、つまり小型軽量で埋め込みが容易である点、長距離伝送が容易な点、防爆性がある点、長寿命な点などから長大構造物の長期間の適用に向いている。しかし、従来までの光ファイバひずみセンサ技術のほとんどは、光ファイバに特殊な加工を施したセンサ部分しか計測することができず、光ファイバに沿った広範囲な計測は不可能であった（離散型：FBG 方式など）。光ファイバに沿って連続的に広範囲な計測が可能なくつかの技術（分布型：OTDR 方式など）もあり、FRP 補強の設計妥当性や施工管理のための計測として適用された事例はあるが、計測時間がかかる、計測位置分解能が低くひび割れ位置などを特定できないなどの点で適用範囲に限界があった。つまり、剥離の検知など詳細なモニタリングのためには、どの箇所にもどのくらいひずみが生じたかを詳細に把握する必要があるが、これらを満足するようなセンサ技術は今まで存在しなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は FRP 補強コンクリート構造物の健全性診断技術に寄与することを目指し、具体的には、従来までの技術を克服した新しい分布型光ファイバセンサ技術である BOCDA 方式（Brillouin Optical Correlation Domain Analysis；ブリルアン光相関領域解析法）を用いたひずみ計測によって、FRP シートの剥離を検知する技術の確立ならびに剥離モデルの解明を目指すものである。

(1) 高位置分解能 BOCDA 方式光ファイバひずみ計測器の高度化：既往研究による FRP シート剥離時のひずみを参考にすれば、必要な光ファイバひずみ計測器の仕様が決めることができる。ここでは、位置分解能 50mm 以下で 100m 以上

の計測範囲を計測精度  $\pm 50 \times 10^{-6}$  でひずみの連続的な分布を計測できる BOCDA 方式光ファイバひずみ計測器の開発を目的とする。

(2) FRP 敷設方法の開発：センサとなる光ファイバには、FRP シート表面の凹凸に対しても十分な付着力を持ちながら、少なくとも 20 年以上程度の耐久性と計測安定性、施工容易性などが要求される。これらの特長を併せ持った光ファイバセンサ実装方法の確立を目的とする。

(3) シート剥離検知技術の確立：(1)～(2)項で得られた計測器とセンサ実装方法を用いた FRP シート剥離検知技術の確立を目指す。ひずみゲージなどを用いた既往研究によれば、剥離箇所では FRP シートとコンクリート間の応力伝達が行われないため、FRP シートのひずみが一定値を示すことが知られており、BOCDA 方式によるひずみ計測で剥離が検知できると期待できる。

(4) 破壊モデルの検証と新しいモデルの提案：実験結果などを精査し、従来の FRP シートとコンクリート界面破壊モデルの検証を行い、必要に応じて新しい破壊モデルの提案を行うことを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) ひび割れ試験

ひび割れ誘発目地を中央部に施したコンクリート試験体表面に、接着剤などが異なるいくつかの方法で光ファイバセンサを設置する。ひび割れの進展に応じて、BOCDA 方式光ファイバセンサでひずみ分布を計測することで、コンクリートから光ファイバセンサへのひずみ伝達機構を明らかにする。また、計測精度や計測安定性の向上を試みた BOCDA システムの高度化を進め、本実験により検証する。

### (2) FRP シート試験

耐久性や施工性に優れたコンクリート補強 FRP シートへの光ファイバセンサ敷設方法を検討、決定する。これらのセンサ実装方法により製作されたコンクリート試験体のシート剥離試験を実施する。コンクリート表面のひび割れ幅増加にともない、FRP シートが剥離する過程のひずみ分布の変化を BOCDA 方式光ファイバひずみセンサで計測する。試験体には別途ひずみゲージを設置し、両者の結果を比較する。光ファイバひずみセンサによる剥離検知を検証するとともに、既存の FRP シートとコンクリート界面の破壊（剥離）モデルの検証を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) ひび割れ試験

コンクリート表面に生じたひび割れは、コンクリートと FRP シートの界面に局部的なせん断力を生じさせるため、補強材の剥離を引き起こす恐れがある。そこで、コンクリートひび割れ時に生じるひずみ分布変化を詳細に確認するために、高い位置分解能を有する分布型光ファイバセンサを表面に貼付した小型コンクリート試験体の引張試験を実施した (図 1)。

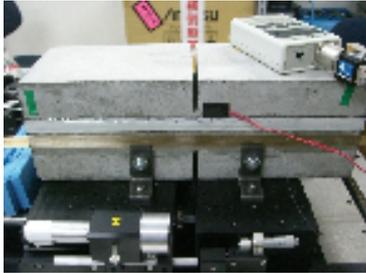


図 1 ひび割れ試験体

試験体中央部に生じたコンクリートひび割れの進展に応じて、BOCDA 方式光ファイバセンサでひずみ分布を測定した (図 2~3)。その結果、今までにない高密度な測定によってひび割れ近傍のひずみ分布を明らかにし、ひずみの最大値や分布形状が、接着剤などの光ファイバセンサの設置方法に依存することを確かめた。また、ひび割れ部から光ファイバセンサ部へのひずみ伝達と、光ファイバセンサの位置分解能のそれぞれを考慮したひずみ分布モデルを提案し、小型試験結果によって本モデルの適用性を一部確認した。これらの結果は、FRP などのコンクリート補強材に生じたひずみ分布測定結果から、ひび割れなどのコンクリート表面状態やコンクリート補強材の剥離などを推定するにあたって大きく寄与するものである。

さらに、高い位置分解能を有する BOCDA 方式分布型光ファイバセンサ測定器の高度化に取り組み、測定器内部の基板を再設計するなどし、ひずみ測定精度の安定化が図られたことを、試験を通じて確認した。

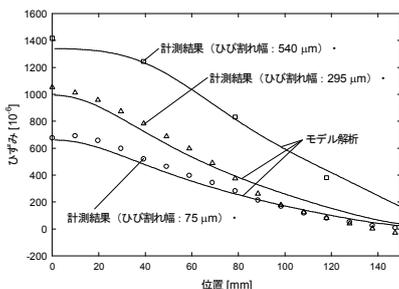


図 2 ひび割れ付近のひずみ分布

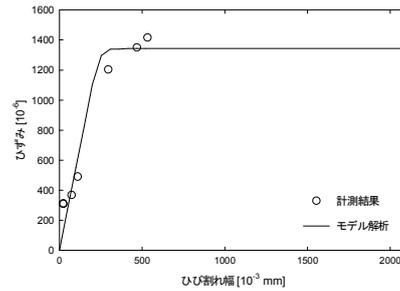


図 3 ひび割れ部のひずみ

##### (2) FRP シート試験 (その 1)

ガラス繊維シートそのものに、光ファイバセンサを織り込んだ FRP 補強シートを試作した (図 4)。本シートによれば、光ファイバセンサに沿ったひずみ分布が計測できるため、①シートの補強効果などを確認すること、②剥離などの局部的な損傷をひずみ変化として検知すること、が期待できる。さらに、高い位置分解能を有する分布型光ファイバひずみ測定器による高密度なひずみ分布を測定すれば、③シート界面の剥離破壊モデル (応力-変位モデル) を明らかにすることが可能である。



図 4 光ファイバセンサ入りガラス繊維シート

その性能検証のために、本シートで補強された小型コンクリート試験体を用いた引張試験を実施した。あらかじめ試験体コンクリート中央部には切り欠きを施したため、引張りによって切り欠き部から補強シートの剥離が生じた。補強シートのひずみ分布を、BOCDA 方式光ファイバセンサで約 6mm の間隔で測定した。測定の結果、切り欠き部近傍に生じたシートの剥離を、一定のひずみ分布を示す範囲として検知することができた (図 5)。また、光ファイバセンサによる高密度なひずみ分布から得られる剥離部の応力-変位モデルは、既往の研究による代表的なモデルと比較して妥当なものであった (図 6)。これらの結果により、本シートの一定の性能を検証することができた。つまり、シートによる補強後にはその補強工法の検証手段として、地震直後などにはその補強健全性の確認手段として、寄与できる。さらには、得られた破

壊モデルは学術的な意義に加えて、設計などへのフィードバックが期待できる。

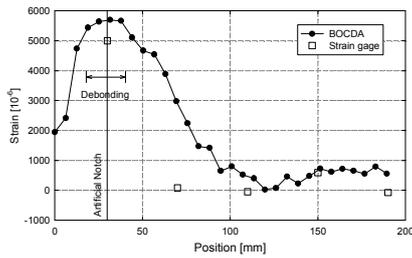


図5 ひび割れ付近のひずみ分布

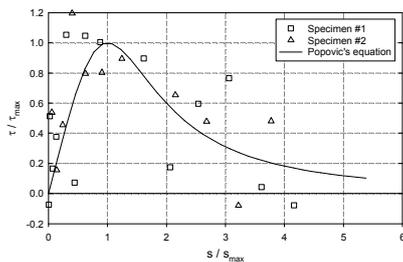


図6 シート界面の応力-変位関係

### (3) FRP シート試験 (その2)

光ファイバセンサを用いたコンクリート補強モニタリング技術のさらなる展開を目的に、今までとは異なるセンサ設置手法を実験的に検証した。そのために、FRP シートで補強された鉄筋コンクリート試験体の4点曲げ試験に、光ファイバひずみセンサを適用した。センサの設置は、コンクリート表面に光ファイバセンサを仮固定した後、FRP シートを付着させるための接着剤を利用して、シート施工とともに光ファイバセンサと試験体を一体化させる手法を採用した。非常に容易で施工性に優れている反面、シート密着のための脱泡ローラー作業の際にセンサに側圧がかかる点に注意が必要であることがわかった。曲げ試験では、試験体への荷重を段階的に増やしながら、ひずみゲージや変位計の計測とともに、BOCDA 方式光ファイバセンサによるひずみ分布計測を行った。その結果、試験体に生じたFRP シート破断を局所的なひずみ変化として捉えることができた。試験体の破壊モードがFRP シート破断先行型であり、試験中にFRP シート剥離は生じなかったが、光ファイバひずみセンサが異なる破壊モードに対しても有効であり、破壊モードの推定が可能であることが確認された。一方で、一部区間で光ファイバセンサの計測結果が不調であったため、設置手法には一部改善の余地があると考えられる。本実験を通じて、補強工とセンサ設置工を同時に行う本手法の一定の実用性が確認できたため、試作した光ファ

イバセンサ織り込み済みシートの付着によるセンサ設置手法と合わせて、コンクリート補強のモニタリング手法の選択肢が広がったものとして意義がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. Imai、R. Nakano、T. Kono、T. Ichinomiya、S. Miura、M. Mure、Crack Detection Application for Fiber Reinforced Concrete Using BOCDA-Based Optical Fiber Strain Sensor、ASCE Journal of Structural Engineering、査読有、Vol.136、No.8、2010、pp.1001-1008

[学会発表] (計2件)

- ① 今井道男、三浦悟、牟禮勝仁、コンクリートひび割れ同定のための分布型光ファイバセンサ実装方法の研究、土木学会第64回年次学術講演会、2009、pp.727-728
- ② M. Imai、H. Suzuki、Highly dense strain measurement of concrete retrofitted with smart fabric、Proc. of SPIE Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring、2011、798318-1-798318-15

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 道男 (IMAI MICHIO)

鹿島建設株式会社技術研究所・先端マイクロエレクトロニクスグループ・主任研究員

研究者番号：20399702