

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18310120
 研究課題名（和文） 安全な杭基礎構造物の実現を目的とした光ファイバセンサ実装技術に関する研究開発
 研究課題名（英文） Development of Sensing Optical Fiber Installation Technique for Safe Pile Foundations
 研究代表者
 名見耶 薫 (NAGOYA KAORU)
 鹿島建設技術研究所・主任研究員
 研究者番号：50416715

研究成果の概要：光ファイバに沿ったひずみを分布的に計測できる技術により、コンクリート構造物の健全性、なかでもひび割れ検知に関する研究開発をおこなった。実験や解析を通じて、今までにないモニタリング手法を確立し、構造物へのセンサ実装化技術を評価することができた。杭基礎構造は目視によるひび割れ検知が不可能なため、本技術のような分布型光ファイバセンサが唯一その解決策となるため、それを実験的且つ解析的に解明した意義は大きい。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	6,600,000	1,980,000	8,580,000

研究分野：社会システム工学・安全システム

科研費の分科・細目：安全システム

キーワード：計測工学，長寿命化，モニタリング，構造工学・地震工学

1. 研究開始当初の背景

わが国の社会基盤を形成する構造物の多くが戦後復興期に建設され、近年その老朽化が懸念されている。これらの構造物は、国民生活の根幹を成すため、継続的な安全性の確保が不可欠である。また、経済的且つ環境的負荷低減の観点からも、構造物に適切な維持補修を繰り返して長寿命化することが重要視されている。これらのためには、構造物を継続的にモニタリングして経時的変状を把握する必要がある。また、都市部への人や資産の集中傾向が高まるなか、頻発する局所災害への対応が望まれている。従来までの目視

や打音法による構造物の検査では、診断範囲が限られ、震災後の復旧に多大な労力が必要である。そこで、重要構造物の健全性を常時モニタリングすることができれば、迅速な健全性の診断が可能となり、減災に寄与する。

一方、光ファイバセンサ技術はその特長から、構造物の変状（ひずみの変化など）をモニタリングする手段として有効である。特に、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殆どは、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（FBG方式など）。いくつかの光ファイバに沿って連続的に広範囲な計測が可能な技術（OTDR方式など）もあるが、計測時間がかかる、計測位置分解能が低い（つまりひび割れ位置などを特定できない）などの点で構造モニタリングへの適用範囲に限界があった。詳細な構造モニタリングのためには、どの箇所にとどのくらいのひずみが生じたか、地震時のひずみ変動はどのようであったか、など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。

申請者らは、東京大学大学院工学系研究科保立教授とともに、従来技術を克服した新しい光ファイバセンサ技術である BOCDA 方式（Brillouin Optical Correlation Domain Analysis； Brillouin 光相関領域解析法）の開発に取り組んできた。これらの結果から、本方式が従来の光ファイバセンサ技術にない計測性能を発揮できることを確認したが、それに伴い従来方式では顕在化しなかった光ファイバの被覆の問題などが、実装化の際の課題として明らかになった。

2. 研究の目的

本研究では前述の背景を鑑み、構造物の健全性診断技術を開発するものである。具体的には、従来技術を克服した新しい光ファイバセンサ技術である BOCDA 方式を用いたひずみ計測技術によるため、以下の特長を有する。

- (1) 光ファイバに沿って広範囲にどこでもひずみを計測できる
- (2) 高い位置分解能で詳細に（条件によって 10cm 以下）にひずみを計測できる
- (3) ある箇所のひずみを動的（条件によって約 20Hz）に計測でき、その箇所を任意に変更できる
- (4) 遠隔地からのモニタリングが可能である。
- (5) 非破壊かつリアルタイムで迅速に結果を知ることができる
- (6) 杭基礎へ設置するのは通常の光ファイバのみであるため、安価かつ長寿命なシステムである

本研究では、構造物の健全性のなかでも特にひび割れ検知に関する研究をおこなった。これは、ひび割れの検知は、コンクリート構造物にとって重要であり、特に杭基礎構造物は目視不可能であり、必要性が高いためである。また、ひび割れのようにどこで発生するか事前に特定できないような事象に対しては、分布型光ファイバセンサ以外では検知不可能である点から適用効果が高いと言える。

本研究ではまず、(1)室内実験においてひび割れ検知性能を確認し、(2)モデル解析を

通じて、ひび割れ幅の同定方法を検討した。本モデルは、実装方法の検討にも役立つものである。そして最後に、(3)フィールド検証実験を通じて、その技術の実用性を検証した。

3. 研究の方法

(1) 室内実験

コンクリート梁試験体（約 3.5m 長）の 4 点曲げ試験（図 1）に、光ファイバセンサを適用して、ひび割れが検知できるかどうかを確認した。光ファイバは、梁下端面にエポキシ接着剤を用いて設置した。载荷ステップごとに、梁に沿ったひずみ分布を BOCDA 方式光ファイバセンサで測定し、顕微鏡によるひび割れ観察も並行しておこなった（図 2）。



図 1 室内実験の様子



図 2 ひび割れ拡大写真

(2) モデル解析

ひずみ分布計測結果から、ひび割れ幅を正確に同定するためには、接着剤などの緩衝効果と、センサの空間信号強度分布を考慮する必要がある。そこで、接着剤～光ファイバ間の力の平衡条件をもとモデル化し、ひび割れが発生した場合に光ファイバに伝達されるひずみ分布を解析した。さらに、BOCDA 方式光ファイバセンサの空間分解能範囲内における計測信号強度が、正規分布していると仮定した。その結果得られたひずみ分布モデルを図 3 に示す。ここでは、実験的に確認され

た光ファイバ～接着剤間の滑りについても、モデル化に考慮している。

以上のモデルを検証するために、異なる設置方法（接着剤など）によりいくつかの光ファイバを設置した小型モルタル試験体で、ひび割れ検知実験をおこなった（図4）。

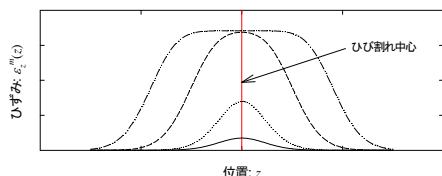


図3 空間分解能を考慮したひずみ分布モデル

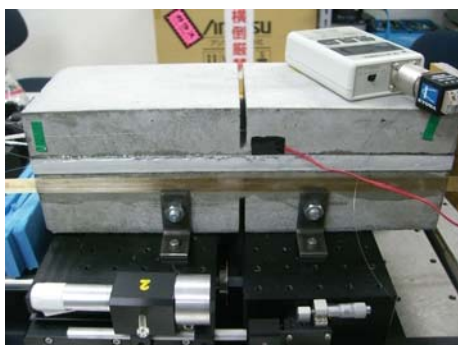


図4 ひび割れ検知実験の様子

(3) フィールド検証実験

(1) 項で確認されたひび割れ検知技術の実構造物における性能検証を目的に、歩道橋（スパン長約 26m）においてフィールド実験をおこなった。光ファイバは、主桁下端面にエポキシ接着剤を用いて設置した（図5）。計測は 2008 年 1 月と 9 月におこない、ひずみ分布の計測結果と、(2) 項によるモデルから、ひび割れ発生の有無を検討した。



図5 実構造物への適用の様子

4. 研究成果

(1) 室内実験

BOCDA 方式光ファイバセンサで得られたひずみ分布計測結果は、解析値に良く一致した（図6）。また、荷重 70kN 時に、試験体中央部に局所的なひずみ変化があらわれた（図7(a)）。その位置と、顕微鏡観察によるひび割れ発生位置は一致した。その結果、得られた局所的ひずみ変化が、ひび割れによるものと確認された。

また、(2) 項のひずみ分布モデル解析をもとに、計測結果を曲線近似した。その近似曲線は、計測結果を良くあらわしており（図7(b)）、モデルから推察されるひび割れ幅と、顕微鏡観察によるひび割れ幅はほぼ一致した。

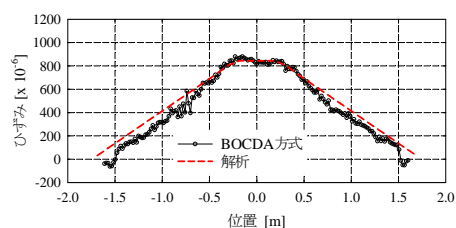
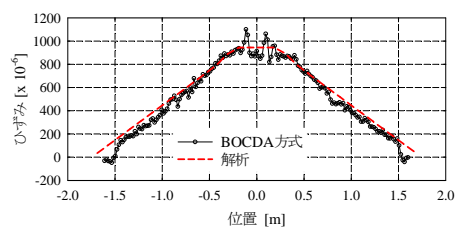
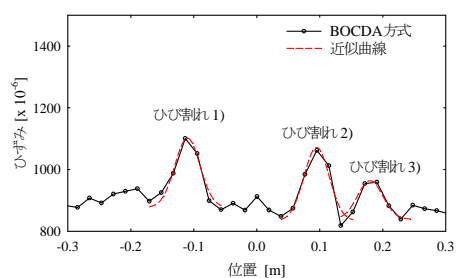


図6 ひずみ分布計測結果 (65kN)



(a) 全体



(b) 中央部拡大

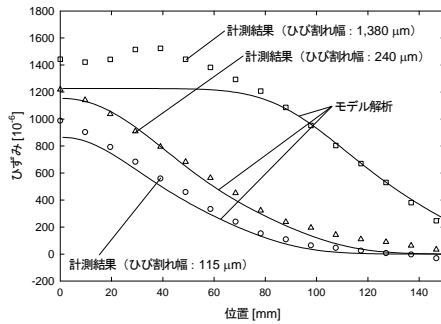
図7 ひずみ分布計測結果 (70kN)

(2) モデル解析

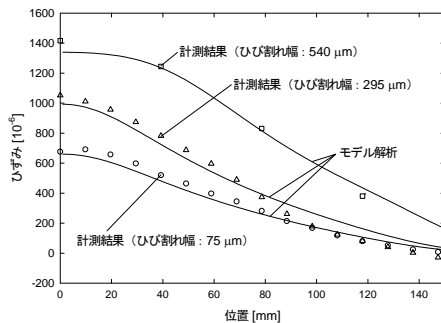
エポキシ接着剤で光ファイバを直接コンクリート表面に設置した場合と、コンクリート表面にゴム系シートを設置したうえに同様に光ファイバを設置した場合における、ひずみ分布の実験結果、モデル解析結果をあわせて図8(a)～(b)に示す。設置方法による、ひび割れ検知能力や影響範囲の違いを定量的に把握することができた。

また、解析結果と計測結果は良く一致した。本解析は、任意の設置条件下における、ひず

み分布からのひび割れ幅の同定に役立つ。さらに、注目すべきひび割れ幅に応じて感度が調節できるため、設置方法の検討に活用することができる。



(a) 設置方法 (エポキシ+光ファイバ)



(b) 設置方法 (ゴム系シート+エポキシ+光ファイバ)

図8 ひび割れによるひずみ分布

(3) フィールド検証実験

2008年1月と9月における主桁下端面の温度差は22度であった。BOCDA方式光ファイバセンサの計測結果は、温度とひずみに依存する。温度影響を差し引くためには、温度上昇による光ファイバ屈折率の変化と、主桁の熱膨張によるひずみ変化を考慮する必要がある。これらを補償したあとのひずみ分布結果を図9に示す。モデル解析で得られた20マイクロ幅ひび割れ時のひずみ分布と比較して、局所的なひずみ変化がないことから、この間にひび割れが発生していないことを確認できた。

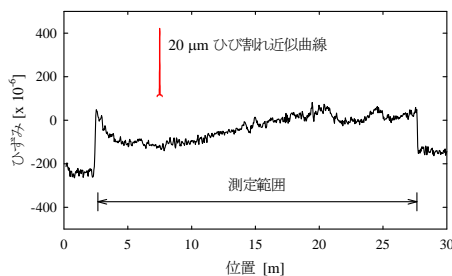


図9 ひずみ分布計測結果

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)

[学会発表] (計 3件)

- ① 今井道男, 中野龍児, 三浦悟, 高位置分解能光ファイバひずみセンサによるひび割れ検知技術の開発, 日本建築学会「最近の計測技術の動向と建築生産の自動化」ワークショップ論文集, 6, 31-34, 2009, 査読無
- ② 中野龍児, 三浦悟, 今井道男, 一宮利通, 河野哲也, 牟禮勝仁, BOCDA方式光ファイバセンサによるコンクリートのひび割れ検知, 土木学会年次学術講演会梗概集, 63, 117-118, 2008, 査読無
- ③ 今井道男, 三浦悟, 保立和夫, 構造ヘルスマニタリング実現に向けたBOCDAひずみセンサの実用化研究, 光波センシング技術研究会講演論文集, 37, 93-100, 2006, 査読無

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称: ブリルアン散乱測定装置

発明者: 中野龍児ほか

権利者: 鹿島建設株式会社ほか

種類: 特許

番号: 特開 2009-31040

出願年月日: 2007年7月25日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

名児耶 薫 (NAGOYA KAORU)

鹿島建設株式会社 技術研究所・主任研究員

研究者番号: 50416715

(2) 研究分担者

今井 道男 (IMAI MICHIO)

鹿島建設株式会社 技術研究所・主任研究員

研究者番号: 20399702

三浦 悟 (MIURA SATORU)

鹿島建設株式会社 技術研究所・グループ長

研究者番号: 20374027

黒沼 出 (KURONUMA IZURU)

鹿島建設株式会社 技術研究所・主任研究員

研究者番号: 30416713

中野 龍児 (NAKANO RYUJI)

鹿島建設株式会社 技術研究所・首席研究員

研究者番号: 50443685