

平成 23 年 6 月 1 日現在

機関番号：12101  
研究種目：基盤研究（B）  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20360197  
研究課題名（和文） 都市インフラの地震被災検知技術の開発  
研究課題名（英文） Development of an seismic damage detection technology  
for civil infrastructures  
研究代表者  
横山 功一（YOKOYAMA KOICHI）  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：20302325

研究成果の概要（和文）：本研究では、FBG（Fiber Bragg Grating）方式の動的分布光センシング手法において、センサ感度向上のためのロングゲージセンサを開発し、計測精度や耐久性を実験的に確認するとともに、供用中の実橋梁での長期モニタリング実験によって、センサの耐久性や適用性を確認できた。また、PVDF（polarized polyvinylidene fluoride）フィルムセンサのクラック検知性能の検討を行うとともに、実構造物への適用性を検証できた。さらに、多点振動計測情報を利用したニューラルネットワーク損傷検知システムの開発を行い、構造物の健全度判定としての有用性を確認できた。

研究成果の概要（英文）：A novel packaged long-gage FBG（Fiber Bragg Grating） sensor for health monitoring of civil structure has been developed and verified to have the ability to obtain effective macro-strain distributions. Experimental study on application of PVDF（polarized polyvinylidene fluoride） film as a crack detection sensor was conducted to detect occurrence and crack propagation of specimen and RC beams. Moreover, the neural network system which was built based on response information of multiple locations is able to grasp damage location and damage extents in structural health monitoring（SHM） of civil structures.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

研究分野：橋梁工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震被災診断，光ファイバセンサ，圧電型センサ，モニタリング，損傷判定

## 1. 研究開始当初の背景

平成7年の兵庫県南部地震は都市を直撃した大規模地震であったことから、都市インフラの被害は深刻であり、その被災状況の把握や復旧活動には多くの時間と費用が費やされた。さらに、平成12年鳥取県西部地震、平成13年芸予地震、平成16年新潟中越地震、平成17年福岡県南西地震、平成19年新潟中越沖地震が相次いで発生しており、都市直下を震源とする次なる大規模地震に備えて、地震被害の迅速な把握、インフラ構造物の被災箇所の検知が可能となる技術開発が喫緊の課題となっている。インフラ構造物の1つである道路施設は緊急避難路として、また、救命活動上の重要な役割を担う施設であり、地震後の二次災害の防止や被災状況の迅速な把握が不可欠であり、地震防災科学分野において発展が必要とされている。

現在の構造物の耐震設計は、鉄筋コンクリートや鋼材を用いて地震力に耐えられるように構造物を造ることが基本になっている。しかしながら、大地震に対して全く被害を受けないように構造物を造ることは現実的には困難であり、現状では大地震時には何らかの損傷を生じると考えざるを得ない。

都市インフラは震後の避難、復旧のための重要な役割を担っており、具備すべき耐震性能の規定より大規模地震に対しても限定された被害にとどめるように設計されている。このため、構造物それぞれの被災状況を把握し、構造物が本来期待されている性能を保持しているかどうかを判定する技術が地震被害を軽減させるために必要であり、そのためには都市インフラに配置するセンサ、センサからのデータ搬送、情報を統合化する情報処理技術、被災診断アルゴリズムなどの幅広い分野の技術を総合する必要がある。

このような状況から、研究代表者らは科学研究費補助金を得て、基盤研究(A)「都市インフラの地震被災診断システムの開発」(H15~17)、基盤研究(B)「都市インフラの地震被災早期判定技術の開発」(H18~19)を、独立行政法人土木研究所との共同研究によって実施し、地震被害を対象にした被災診断システムの開発について先駆的な成果を挙げた。

## 2. 研究の目的

本研究は、背景で述べた既往の研究によりその特長が顕著に示されたブロードバンドセンサ技術と被災状況の分布型計測・診断技術の中から、光ファイバセンサや記憶型センサを用いたブロードバンド分布型センシ

ングに研究の焦点を絞り、土木インフラの実構造物への適用を主眼においた被災診断システムを開発する。すなわち、本研究では都市域を大規模地震が襲った際に、都市インフラの被災状況を迅速に把握し、緊急対応に役立てられるように、先端材料・先端技術を活用した都市インフラの地震被災度を客観的、かつ精度良く判定するためのセンシング技術及び地震被災診断・判定システムの開発を目標とする。

具体的には、構造物のどの位置で、どの程度の地震被災が生じたかを検知・記憶するブロードバンド地震被災検知センサの開発として、FBG (Fiber Bragg Grating) 方式の光ファイバセンサおよび PVDF (polarized polyvinylidene fluoride) フィルムを用いた圧電センサの開発を行う。そして、各種センサからの多点計測情報を統合して構造物の全体および局所の健全度を判定・評価するニューラルネットワークシステムの開発を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) ロングゲージ FBG センサの高感度化手法

点センサである FBG センサをロングゲージセンサ化するためには、プリテンションを入れ定点接着することが必要である。それにより、定点接着の間のひずみ分布が一定となりロングゲージ化が可能になる。しかしながら、ロングゲージセンサにおいては、局所的なひずみを計測する際に、ゲージ長により感度が低下してしまうという問題がある。そこで、高い弾性率を有する FRP を用いて保護部と非保護部をつくることで、意図的にひずみ集中を生じさせ高感度化させる手法を提案した。図-1 および図-2 に概略図を示す。FRP チューブは、FRP を編みこみ中空にしたものである。図-2 に示される高感度化センサでは、このチューブと FRP 部の間にはいくらかの摩擦が生じており、この摩擦が感度に影響を与える。



図-1 ロングゲージ FBG センサの概念

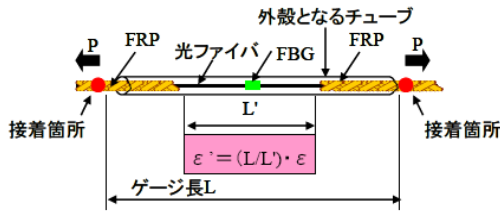


図-2 高感度化されたロングゲージ FBG センサの概念

(2) PVDF フィルムセンサによる RC 梁の曲げひび割れ検知性能試験の概要

PVDF フィルムセンサによって、RC 梁の曲げ荷重時の底面と側面のひび割れの発生と伸展の把握を試みた。荷重によって生じる曲げひび割れは、梁下部の引張側より発生するので、PVDF フィルム (PVDF1~3) を荷重点下の側面表に、また PVDF フィルム (PVDF4~6) を底面の対応する位置に貼った(図-3)。試験は 4 点曲げ荷重として梁側面と底面のひび割れ発生と伸展の計測に重点をおいた。なお、目視によって初期ひび割れは約 20 (kN) で確認できた。その後、荷重を破壊前の約 40 (kN) まで荷重した。また、荷重中の PVDF フィルムの電圧計測はチャージアンプと同センサインタフェイス (PCD-320A) を経由して取り込む方法で行い、側面と底面のひび割れは荷重を 5kN ごとに停止して荷重と共に記録した。

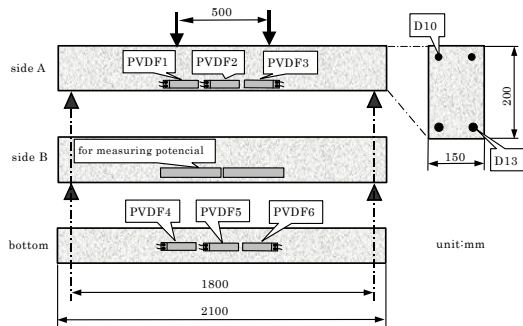


図-3 PVDF フィルムセンサによる RC 梁の曲げひび割れ検知性能試験の供試体

(3) ニューラルネットワークを利用した損傷判定の考え方

本研究では、階層型ニューラルネットワーク (Neural Networks : NN) を利用した損傷判定法を提案した。損傷判定の考え方を図-4 に示す。本手法ではリアルタイム性を重視し、健全時の橋脚構造システムを同定するための NN の学習は、過去に橋脚で得られた小規模の地震応答記録を用いて、大地震以前に済ませておくこととした。そして、大地震発生時には予め同定した健全時の橋脚構造システムに地震応答データを入力して NN 予測値

を算定する。橋脚に損傷が生じた場合 NN 予測誤差が生じるが、誤差として振幅比と位相差に着目し、損傷程度の変化の推定を試みる。振幅比・位相差の算定は、橋脚の絶対加速度応答の NN 予測値と実測値のリサーチグラフから求める。リサーチグラフから振幅比・位相差を求めるには、最低限 1 周期の 2 波形 (橋脚の応答実測値, NN 予測値) が必要となる。したがって、実測値をリアルタイムに取得可能ならば、ある精度を確保するための数サイクルの振動波形を解析するに要する時間が本研究でめざすリアルタイムに相当することになる。

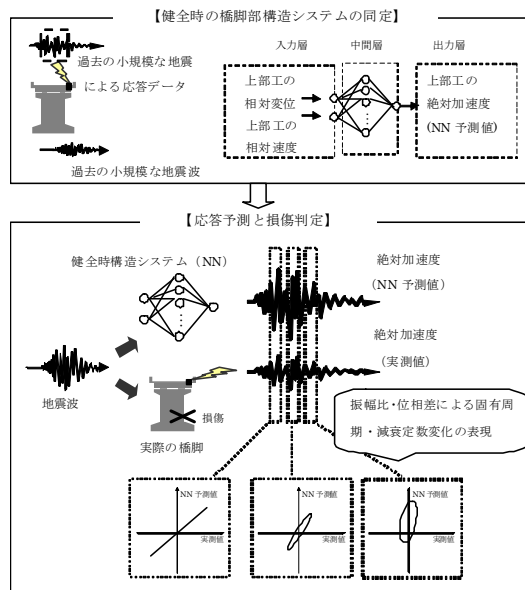


図-4 ニューラルネットワークを利用した損傷判定の考え方

4. 研究成果

(1) 高感度ロングゲージ FBG センサによる実橋梁モニタリング

茨城県水戸市にある実橋梁を対象に、開発した高感度ロングゲージ FBG センサの性能試験を実施した。感度 4 倍のセンサと 2 倍のセンサを作成し、すでに既設してあるロングゲージセンサ (感度 1 倍) と比較した。各センサは平行に敷設した。図-5 は各センサのトラック通過時の計測ひずみの変化である。図-6 は図-5 における感度倍率の変化を示している。見て分かるように新たに敷設したすべりが確保された高感度化センサ同士の比較である B のグラフにおいては感度倍率がほぼ一定であることが分かる。それに対し、A と C のグラフにおいては、摩擦対策をとっていない以前敷設したロングゲージセンサと比較しているため、ロングゲージの場合に外殻となる FRP チューブとセンサ間に多少の摩擦が生じ、感度倍率に多少の変動が見られる。

このことから計測物との一体化を防ぐチューブと、センサの間に生じる摩擦が計測精度に影響を与えることが分かる。摩擦影響を除去したセンサにおいても、X地点のように小ひずみ状態においては、感度倍率に誤差が生じていた。センサの精度による影響であると考えられるため、ロングゲージセンサの計測精度の試験を行った結果、実橋梁に敷設したFRPを用いた各センサにより外殻となるチューブとセンサの間の摩擦による影響を確認し、その摩擦を小さくすることで感度倍率の変動が小さくなり、計測精度が向上することを確認でき、高感度化されたFBGロングゲージセンサの有用性を確認できた。

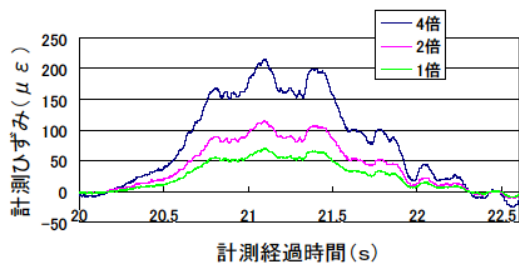


図-5 感度倍率の変化による計測ひずみの変化

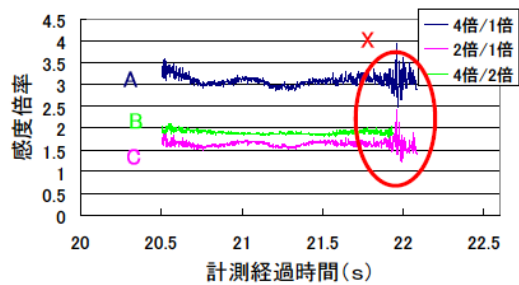


図-6 感度倍率の変化

(2) PVDF フィルムセンサによる RC 梁の曲げひび割れ検知性能の検証

梁側面の PVDF フィルム (PVDF1~3) の荷重-出力電圧図 (図-7) により、ひび割れ伸展を検討した。荷重 20kN までは、PVDF フィルムの出力電圧はほとんどゼロであるが、20kN を超えると PVDF2 と PVDF3 は段階的に出力が増加し始めた。一方、PVDF1 はやや遅れて荷重が 24kN 程度から増加を始め、その後段階的に増加を続けた。一方、梁底面のひび割れ伸展状況を荷重-PVDF フィルム (PVDF4~6) の出力電圧図 (図-8) で検討した。この場合も、図-7 によく似て段階的に増加しており、PVDF5 と PVDF6 が先行し、PVDF1 の出力電圧が後から増加した。底面と側面のひび割れの関係について、詳しく見るために図-9 に PVDF2 (底面) と PVDF5 (側面) の出力電圧を示した。同一荷重において、出力電圧が段階的に増加し、底面から発生したひび割れは側

面でも観測され、さらに出力電圧の大きさから底面のひび割れ幅が常に側面のひび割れ幅よりも大きな状態を保ちながら進展していく様子が確認できた。

以上の RC 梁の曲げ載荷における PVDF フィルムの検知・伸展能力についての実験結果から、目視による初期ひび割れの確認以前に、PVDF フィルムによる計測で初期ひび割れ発生を検知することができ、また荷重増加に伴うひび割れの進展状況を捉えることができたことから、PVDF フィルムセンサのひび割れ検知性能は有効であると考えられる。

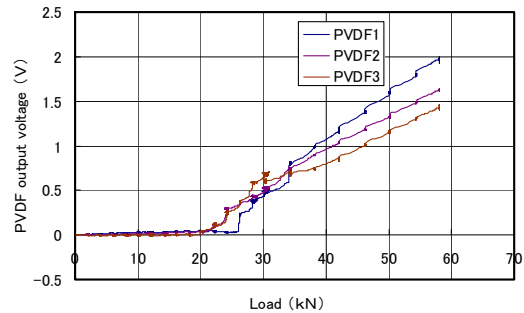


図-7 側面の PVDF フィルム出力と荷重

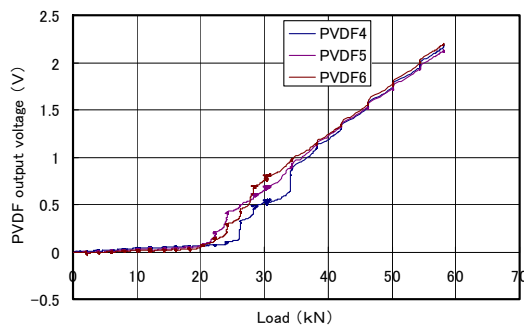


図-8 底面の PVDF フィルム出力と荷重

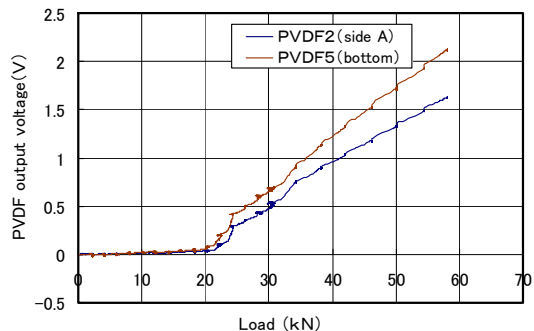


図-9 PVDF フィルム出力の比較

(3) RC 単柱の加振実験結果との比較によるシステムの損傷検知性能の検証

本研究では、まず RC 単柱の加振実験によって生じた損傷程度の変化を固有周期と減

減衰数の変化に着目して評価した。加振実験の結果として得られた橋脚のウェイト中心位置における強制振動時の地震応答データを用いて、等価線形化法の考え方に基いて、加振1～6回目からの等価固有周期(図-10棒グラフ部分)と等価減衰定数(図-11棒グラフ部分)を算出した。その結果、加振2回目以降、RC単柱の損傷により固有周期・減衰定数ともに基本的には増加傾向にあり、剛性が低下していることが予想されるが、等価減衰定数に関しては加振5回目から加振6回目にかけて減少している。

そこで図-12に示すように、加振1回目のデータでNNシステムを学習させ、加振実験の結果と比較してシステムの損傷検知性能を検証した。図-10より振幅比変化は固有周期変化と概ね対応していることがわかる。ただし加振5回目から6回目の減衰定数の値が減少したことにより、固有周期変化と比較して振幅比変化は大きく増加している。一方、図-11より位相差変化については減衰定数変化と概ね対応していることがわかる。加振1回目から加振5回目までの剛性が低下傾向にある領域では減衰定数は理論どおりに増加傾向を示し、位相差も増加傾向を示している。加振5回目から6回目にかけての被りコンクリート剥落のような、剛性低下に比べて粘性減衰係数の低下が顕著な損傷の場合は、位相差が概ね減衰定数変化を表している。

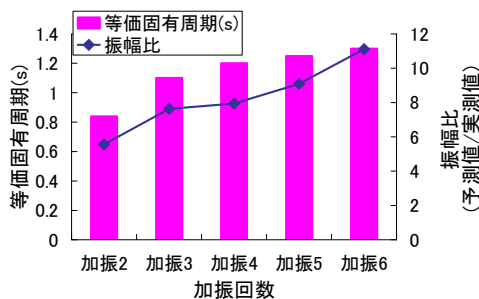


図-10 実験から求めた等価固有周期とNNシステムから求めた振幅比の比較

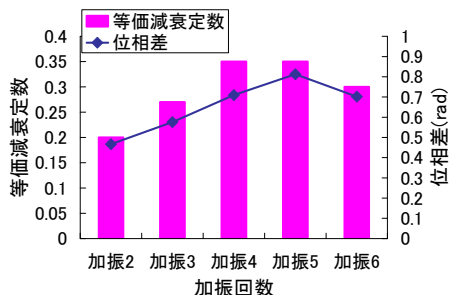


図-11 実験から求めた等価減衰定数とNNシステムから求めた位相差の比較

以上の結果より、ニューラルネットワーク

を用いた損傷検知法の有用性を確認できるとともに、システムにおける損傷判定の即時性についても実現可能性を見いだした。

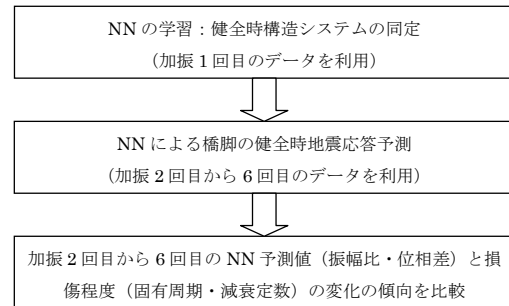


図-12 NNシステムの学習方法と実験結果との比較方法

## 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7件)

- ① A. P. Adewuyi, Z. S. Wu : Modal macro-strain flexibility methods for damage localization, in flexural structures using long-gage FBG sensors, Structural Control and Health Monitoring, 査読有, Vol.18, Issue 3, 2011, pp. 341-360
- ② Suzhen Li, Zhishen Wu, Lili Zhou : Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors, Structure and Infrastructure Engineering, 査読有, Vol.6, Issue 3, 2010, pp. 303-315
- ③ Li, S. and Wu, Z. S. : Parametric estimation for RC flexural structures based on distributed long-gage fiber optic sensors, Journal of Structural Engineering, ASCE, 査読有, Vol.136, No. 2, 2010, pp. 144-151
- ④ Adewuyi, A. P. and Wu, Z. S. : Vibration-based structural health monitoring technique using statistical features from strain measurements, Journal of Engineering and Applied Sciences, 査読有, Vol. 4, No. 3, 2009, pp. 38-47
- ⑤ Li, S. and Wu, Z. S. : Sensitivity enhancement of long-gage FBG sensors for Macro-strain measurements, Structural Health Monitoring, 査読有, Vol. 8, No. 6, 2009, pp. 415-423
- ⑥ Li, S. and Wu, Z. S. : A Model-free Method for Damage Locating and Quantifying in Beam-like Structure based on Dynamic Distributed Strain

Measurements, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 査読有, Vol.23, No.5, 2008, pp.404-413

- ⑦ Li, S. and Wu, Z.S. : Modal Analysis on Macro-strain Measurements from Distributed Long-gage Fiber Optic Sensors, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol.19, No.8, 2008, pp.937-946

[学会発表] (計6件)

- ① 田名部菊次郎, 横山功一, 原田隆郎, 服部一央: 圧電フィルム・センサの繰り返しひずみ耐久性に関する実験的検討, 第37回土木学会関東支部技術研究発表会, 2010.3.12-13, 日本大学理工学部, 東京
- ② Wu, Z.S. : Improvement of typical Damage Identification Techniques Using Dynamic Strain Distribution from Long-Gage FBG Sensors(keynote), Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering, 2009.11.28-30, Guangzhou, China
- ③ Adewuyi, A. P. and Wu, Z.S. : Performance of modal macrostrain-flexibility methods for damage localization using long-gage FBG sensors, 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2009.9.9-11, Stanford, California, USA
- ④ Adewuyi, A. P. and Wu, Z.S. : Structural damage localization using modal macro strain-based flexibility methods with long-gage FBG sensors, 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2009.7.22-24, Zurich, Switzerland
- ⑤ Yokoyama, K. and Harada, T. : Structural Monitoring using Piezoelectric Film, Proceedings of the 24th US-Japan Bridge Engineering Workshop, 2008.9.23, Minneapolis, Minnesota, USA
- ⑥ Harada, T. and Yokoyama, K. : Development of Bridge Inspection System by Using Wireless Network Technologies, The 4th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technologies, 2008.6.25, Tokyo, Japan

横山 功一 (YOKOYAMA KOICHI)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 20302325

(2) 研究分担者

呉 智深 (WU ZHISHEN)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号: 00223438  
原田隆郎 (HARADA TAKAO)  
茨城大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00241745

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者